

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

НЕДАШКІВСЬКА НАДІЯ ІВАНІВНА

УДК 517.9, 519.816

**МЕТОДОЛОГІЯ ТА ІНСТРУМЕНТАРІЙ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ
РІШЕНЬ НА ОСНОВІ ІЄРАРХІЧНИХ ТА МЕРЕЖЕВИХ МОДЕЛЕЙ**

01.05.04 – Системний аналіз і теорія оптимальних рішень

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Інституті прикладного системного аналізу Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Науковий консультант: член-кореспондент НАН України,
заслужений діяч науки і техніки України,
доктор технічних наук, професор
Панкратова Наталія Дмитрівна,
Інститут прикладного системного аналізу» Національного
технічного університету України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
заступник директора

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Міхайленко Віктор Мефодійович,
Київський національний університет будівництва
і архітектури МОН України,
завідувач кафедри інформаційних технологій
проектування та прикладної математики

доктор фізико-математичних наук, професор
Наконечний Олександр Григорович,
Київський національний університет
імені Тараса Шевченка МОН України,
завідувач кафедри системного аналізу
та теорії прийняття рішень

доктор технічних наук, професор
Циганок Віталій Володимирович,
Інститут проблем реєстрації інформації НАН України,
завідувач лабораторії систем підтримки прийняття рішень

Захист відбудеться 04 грудня 2018 р. о 15 годині 00 хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.03 Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ-56, пр. Перемоги, 37, корп. №35, ауд. 001.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ-56, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий 02 листопада 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.002.03

В. Капуста

В.О. Капустян

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасні економічні системи, які швидко змінюються з часом та мають нові особливості, потребують включення якісних складових та суджень експертів в модель прийняття рішень. В останні роки набули розвитку методи підтримки прийняття рішень (ППР) на основі ієрархій та мереж критеріїв. Вони використовуються в багатьох прикладних областях для розв'язання багатокритеріальних та багатоцільових задач вибору, розподілу ресурсів, аналізу співвідношення доходи-витрати, аналізу сценаріїв розвитку, оцінювання, планування та передбачення. З 1988 року проходить міжнародний симпозіум з методу аналізу ієрархій (МАІ). Тематика доповідей включає теоретичні питання розробки модифікацій та узагальнень цього методу, а також практичні застосування МАІ. Окремо розглядають застосування МАІ в медицині і охороні здоров'я, оцінюванні проектів, економіці, фінансах та банківській справі.

На відміну від методів і засобів дослідження операцій, економетрики та інших, які розв'язують задачі прийняття рішень з кількісними значеннями змінних і відношень між ними, методи ППР спрямовані на розв'язання слабо структурованих задач, які характеризуються унікальністю, відсутністю формалізованої цілі і оптимальності в класичному розумінні, неповнотою, невизначеністю, нечіткістю даних, відсутністю кількісної інформації в обсязі, необхідному для прийняття рішення. Опис слабо структурованих задач здійснюється, як правило, експертами-фахівцями в даній області. Основними перевагами МАІ перед іншими експертними методами вважається структуризація складної проблеми у вигляді ієрархії, яка включає кількісні та якісні критерії рішень, і отримання експертних оцінок методом парних порівнянь, що найкращим чином враховує психофізіологічні особливості людини.

Методи ППР на основі ієрархій та мереж широко досліджуються, розробляються і використовуються за кордоном. В Україні ці методи практично не набули свого розвитку. Так, розрахунку ваг на основі матриць парних порівнянь присвячено роботи S.Bozóki, J.Fülöp, L.Csató, J.Temesi, W.W.Koczkodaj, J.Szybowski, I.Durbach, R.Lahdelma, P.Salminen, S.Lipovetsky, W.M.Conklin, E.U.Choo, E.R.Jalao, W.C.Wedley, R.Ramanathan, B.Chandran, B.Golden, E.Wasil, T.Wu, D.Shunk, Liang-an Huo, Jibin Lan, Z.Wang, Y.M.Wang, C.Parkan, Nikolai V. Hovanov, Mikhail V. Sokolov, Y.Luo, L.Elsner, P. van den Driessche, G.Crawford, C.Williams, T.L.Saaty, B.Г.Тоценка, B.В.Циганка, B.Д.Ногіна, Л.В.Уткіна, О.А.Павлова та ін.

Проблема аналізу і підвищення узгодженості експертних оцінок парних порівнянь досліджувалася в роботах J.Aguarón, J.M.Moreno-Jiménez, M.Lamata, J.I.Peláez, J.A.Alonso, J.Benítez, X.Delgado-Galván, J.Izquierdo, R.Pérez-García, G. Kou, S.Bozóki, T.Rapcsák, M.Brunelli, A.Critch, M.Fedrizzi, W.W.Koczkodaj, J.Szybowski, D.Ergu, M.Kwiesielewicz, E.van Uden, S.Lipovetsky, W.M.Conklin, C.Lin, P.Linares, N.Osei-Bryson, J.Ramík, P.Korviny, S.Siraj, L.Mikhailov, W.E.Stein, P.Mizzi, J.Stoklasa, L.G.Vargas, T.L.Saaty, B.Г.Тоценка, B.В.Циганка, Н.Д.Панкратової та ін.

Методам розрахунку ваг на основі інтервальних або нечітких матриць парних порівнянь, оцінюванню узгодженості таких матриць присвячено роботи J.Krejčí, J.Ramík, P.Korviny, T.Entani, M.Inuiguchi, L.Chen, Z.Xu, F.Liu, Q. Da, S.Chouinard, J.Guisse, E.Dopazo, Z.-J.Wang, Y.-M.Wang, W.G.Zhang, Y.Luo, Z.Hua, K.S.Chin,

J.H.Fu, T.M.S.Elhag, S.A.Torabi, H.Rafiei, K.Sugihara, H.Ishii, H.Tanaka, F.Herrera, F.Chiclana, E.Herrera-Viedma, L.Mikhailov, Н.Д.Панкратової, О.А.Павлова та ін.

Аналіз стійкості оцінок варіантів рішень досліджується у роботах J.Aguarón, M.Escobar, J.M. Moreno-Jiménez та В.В. Циганка.

Існують системи підтримки прийняття рішень (СППР), в яких реалізовано методи ППР на основі ієрархій та мереж. Це СППР Super Decisions, Decision Lens, Logical Decisions, Make It Rational, Svir, Expert, Mpriority, Vibor, Solon.

Існуючі методи та СППР мають наступні обмеження: недостатньо обгрунтовано рівень узгодженості чітких та нечітких експертних оцінок без участі експерта; недостатньо вивчено та реалізовано в СППР питання щодо оцінювання і підвищення узгодженості нечітких експертних оцінок без участі експерта; необхідність розраховувати інтервали довіри до локальних і агрегованих ваг; недостатньо формалізовані та реалізовані в СППР методи знаходження локальних і агрегованих ваг на основі нечітких експертних оцінок; недостатньо враховано при розрахунку ваг невизначеність, яка спричинена шкалою та особистими якостями експерта; недостатньо проводиться аналіз чутливості та стійкості локального та глобального ранжувань до змін в оцінках експертів.

Таким чином, ускладнення процесу прийняття рішень, складність взаємозв'язків між факторами, які впливають на вибір того чи іншого варіанту рішення, збільшення ризиків та ціни за неправильно прийняте рішення, недостатність детермінованої інформації для прийняття рішень *зумовлюють актуальність теми роботи*. Дане дисертаційне дослідження спрямоване на розробку методології та інструментарію підтримки прийняття рішень в складних слабо структурованих системах на основі ієрархічних та мережевих моделей.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у відділі математичних методів системного аналізу Інституту прикладного системного аналізу (ІПСА) КПІ ім. Ігоря Сікорського у відповідності до планів науково-дослідних робіт: НДР «Розробка та дослідження теоретичних основ методології сценарного аналізу», № 2250, № держреєстрації (ДР) 0107U004124; НДР «Розробка методів та прийомів моделювання сценаріїв майбутніх подій», №2144-п, № ДР 0108U000256; НДР «Розробка платформи сценарного аналізу в межах сталого розвитку», № 2323-п, № ДР 0110U002364; НДР «Розробка теоретичних засад прийняття рішень на основі методології передбачення», № 2263-ф, № ДР 0112U000558; НДР «Розробка інформаційної системи супроводження процесу передбачення», № 2523-п, № ДР 0112U003164; НДР «Синтез методологій передбачення і когнітивного моделювання щодо розробки стратегії інноваційного розвитку регіону», № 2278/14, № ДР 0114U004076.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є розробка методології та інструментарію підтримки прийняття рішень, які дозволять підвищити достовірність розв'язків задач ППР в складних слабо структурованих системах на основі ієрархічних та мережевих моделей. Для досягнення мети дослідження поставлені і розв'язані такі задачі:

1. Виконано аналіз існуючих методів підтримки прийняття рішень, модифікацій та узагальнень методу аналізу ієрархій та методу парних порівнянь.

2. Запропоновано методологію підтримки прийняття рішень в складних слабо структурованих системах на основі ієрархічних та мережевих моделей.
3. Розроблено засоби оцінювання достовірності результатів, отриманих на основі ієрархічних та мережевих моделей.
4. Розроблено метод оцінювання і підвищення узгодженості експертних оцінок, представлених матрицями парних порівнянь (МПП) загального виду.
5. Розроблено метод розрахунку довірчих інтервалів для локальних ваг елементів ієрархічної моделі підтримки прийняття рішень.
6. Запропоновано метод розрахунку нечітких локальних ваг елементів мережевої моделі ППР на основі нечітких експертних оцінок.
7. Запропоновано гібридний метод розрахунку локальних і агрегованих ваг елементів ієрархічної моделі із взаємозалежними критеріями рішень.
8. Розроблено метод комплексного оцінювання чутливості ранжування елементів ієрархічної моделі підтримки прийняття рішень.
9. Запропоновано спосіб оцінювання появи реверсу рангів при використанні правил комбінування функцій довіри.
10. Розроблено методики і засоби аналізу ефективності методів, систему моделювання експертного оцінювання.
11. Розроблено інструментарій підтримки прийняття рішень у вигляді СППР на основі запропонованих моделей, методів та підходів.
12. Застосовано розроблену методологію та інструментарій до розв'язання ряду практичних задач ППР на замовлення міністерств і відомств України.

Об'єктом дослідження є процес оцінювання розв'язків задач підтримки прийняття рішень в складних слабо структурованих системах.

Предмет дослідження – моделі і методи, методики і засоби для аналізу ієрархічних та мережевих моделей підтримки прийняття рішень.

Методи дослідження ґрунтуються на використанні методологій системного аналізу, передбачення, теорії підтримки прийняття рішень, нечітких множин, довіри, моделювання, методів парних порівнянь та оптимізації.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна роботи визначається наступними теоретичними і практичними результатами, отриманими автором:

Уперше:

1. Запропоновано методологію підтримки прийняття рішень, яка з використанням системного підходу дозволяє підвищити достовірність розв'язків задач ППР в складних слабо структурованих системах на основі ієрархічних та мережевих моделей і включає:
 - метод оцінювання і підвищення узгодженості матриць парних порівнянь,
 - метод розрахунку довірчих інтервалів для локальних ваг на основі МПП,
 - метод розрахунку нечітких локальних ваг на основі нечітких МПП,
 - гібридний метод розрахунку агрегованих ваг,
 - метод комплексного оцінювання чутливості розв'язку,
 - методики і засоби аналізу ефективності методів.

2. Розроблено метод оцінювання і підвищення узгодженості експертних оцінок елементів мережевої моделі, представлених МПП, який відрізняється від інших врахуванням властивості слабкої узгодженості МПП, пошуком найбільш неузгодженого елемента МПП та використанням для МПП загального виду; спосіб підвищення узгодженості МПП без участі експерта на основі відомих мультиплікативного та адитивного методів, який відрізняється від інших новими отриманими властивостями.
3. Запропоновано метод розрахунку довірчих інтервалів для локальних ваг елементів ієрархічної моделі, який, на відміну від інших, враховує невизначеність шкали і особисті якості експерта, такі як оптимізм і песимізм, та не потребує порівняння груп елементів з фреймом; показник невизначеності експертних оцінок парних порівнянь.
4. Розроблено методики, засоби і систему моделювання експертного оцінювання та спосіб оцінювання реверсу рангів при використанні різних правил комбінування функцій довіри до елементів ієрархічної моделі.

Набули подальшого розвитку:

1. Гібридний метод розрахунку локальних і агрегованих ваг елементів ієрархічної моделі із взаємозалежними критеріями, який відрізняється від інших методом оцінювання і підвищення узгодженості МПП загального виду.
2. Метод розрахунку нечітких локальних ваг елементів мережевої моделі на основі нечітких МПП, який відрізняється від інших методом оцінювання і підвищення узгодженості, врахуванням властивостей сильного і слабого збереження порядку на множині нечітких ваг.
3. Метод комплексного оцінювання чутливості розв'язку задачі підтримки прийняття рішень на основі ієрархічної моделі шляхом врахування оцінки чутливості локального ранжування елементів цієї моделі; показник стійкості локального ранжування.

Удосконалено метод потоків для пошуку найбільш неузгоджених експертних оцінок елементів мережевої моделі шляхом врахування вхідного потоку.

Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні інструментарію у вигляді СППР на основі запропонованого математичного та методологічного забезпечення для розв'язання задач підтримки прийняття рішень в складних слабо структурованих системах з людським фактором на основі ієрархічних та мережевих моделей. Побудований інструментарій використано при розв'язанні наступних практичних задач:

- оцінювання критичних технологій енергетики України в межах договірної тематики з Міністерством освіти і науки України;
- оцінювання напрямків доцільного використання космічної інформації дистанційного зондування землі для геоінформаційних систем при виконанні НДР спільно з Інститутом космічних досліджень;
- оцінювання сценаріїв розвитку транспортної системи міста Києва на замовлення КМДА;

- вибір пріоритетних заходів вирішення соціальних проблем міста Києва з точки зору доходів, витрат, можливостей та ризиків на замовлення Київської міської державної адміністрації (КМДА).

Результати дисертації були впроваджені в Інституті космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України (акт впровадження від 15 лютого 2018 р.), в Інституті проблем реєстрації інформації НАН України, а також в навчальний процес кафедри математичних методів системного аналізу ІПСА КПІ ім. Ігоря Сікорського, зокрема при викладанні дисциплін «Прийняття рішень в ієрархічних системах», «Інтелектуальні системи прийняття рішень» та при виконанні магістерських робіт студентів спеціальностей 8.04030301 «Системний аналіз і управління» та 8.04030302 «Системи і методи прийняття рішень» (акт впровадження від 20.02.2018 р.).

Особистий внесок здобувача. Всі наукові положення та результати, що складають зміст роботи та становлять наукову новизну, отримані автором самостійно. Здобувачем поставлено і розв'язано задачі розробки методології і системного підходу до ППР в складних слабо структурованих системах на основі ієрархічних та мережевих моделей, розробки і дослідження методів оцінювання і підвищення узгодженості, розрахунку довірчих інтервалів, локальних ваг на основі нечітких експертних оцінок, гібридного методу для взаємозалежних критеріїв рішень, оцінювання чутливості, реверсу рангів, розробки показника невизначеності експертних оцінок парних порівнянь та показника стійкості локального ранжування. Здобувачем поставлено задачі моделювання, розроблено методики, засоби та систему моделювання експертного оцінювання, використано їх для дослідження ефективності пропонованих методів. Здобувачем розроблено архітектуру і функціональну схему СППР, написано програмні модулі, в яких реалізовано пропоновані методи, проведено тестування цих модулів, побудовано моделі та виконано розрахунки за задачами, які складають практичну значущість роботи.

Здобувачем запропоновано ідею та методологію підтримки прийняття рішень для підвищення достовірності розв'язків задач ППР в складних слабо структурованих системах на основі ієрархічних та мережевих моделей, в межах якої розроблено і досліджено системний підхід, що включає методи, методики, способи, показники.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації доповідались на наукових конференціях та семінарах:

- міжнародних конференціях «Системний аналіз та інформаційні технології» (м.Київ, 2008 – 2017 рр);
- міжнародному симпозіумі ISAHP – 2011 «XI International Symposium for the AHP/ANP» (м.Неаполь, Італія 15-18 червня, 2011р);
- міжнародній конференції CODATA: Scientific information for society – from today to the future (м.Київ, 2008р.);
- міжнародних науково-практичних конференціях ITHEA (м. Варна, Болгарія, 2012, 2013, 2015, 2016);
- міжнародних наукових конференціях «Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта» ISDMCI (м.Залізний порт, 2015, 2016);

- міжнародній науково-практичній конференції «Системный анализ в проектировании и управлении» (м. Санкт-Петербург, 2014);
- міжнародній конференції з автоматичного управління «Автоматика-2013» (м. Миколаїв, 2013);
- міжнародних конференціях «Інтелектуальний аналіз даних» ІАІ (м. Київ, 2008, 2011, 2012, 2015);
- науково-технічних конференціях з міжнародною участю «Системи підтримки прийняття рішень. Теорія і практика» СППР (м. Київ, 2010, 2011);
- міжнародній науково-практичній конференції «Системний аналіз. Інформатика. Управління» САІУ (м. Запоріжжя, 2012);
- міжнародній науково-практичній конференції «Інформація, аналіз, прогноз – стратегічні важелі ефективного державного управління» (м. Київ, 2010);
- міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології і системи в документознавчій сфері» (м. Донецьк, 2011);
- міжнародній науково-практичній конференції «Математичне і програмне забезпечення інтелектуальних систем» (м. Дніпропетровськ, 2011);
- всеукраїнській науково-практичній конференції «Информационно-компьютерные технологии в экономике, образовании и социальной сфере» (м. Симферополь, 2010);
- науковому семінарі ІПСА КПП ім. Ігоря Сікорського (Україна, Київ, 07.02.2018р.).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано **55** наукових праць, серед них **21** – у провідних фахових виданнях (12 – у зарубіжних виданнях, 9 – в українських наукових фахових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних), **1** – у інших наукових виданнях, **1** навчальний посібник з грифом МОНУ, **32** статей та тез у матеріалах доповідей зарубіжних симпозіумів, міжнародних і національних конференцій.

Структура дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається з переліку умовних позначень, вступу, семи основних розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Робота складається з 407 сторінок. Основна частина роботи викладена на 280 сторінках, містить 46 рисунків і 56 таблиць. Список використаних джерел складається з 423 найменувань на 42 сторінках. Додатки містять ілюстрації результатів аналізу, початкові дані для задачі оцінювання критичних технологій в енергетиці України та копії актів впровадження результатів роботи.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність розробки методів та інструментарію підтримки прийняття рішень на основі ієрархічних та мережових моделей; визначені: мета, об'єкт, предмет і методи дослідження; показано зв'язок з науковими програмами, планами, темами; наведено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів; висвітлено особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** виконано огляд і аналіз досліджень з питань розв'язання багатокритеріальних задач ППР. Проведено аналіз сучасного стану розвитку методів ППР на основі ієрархій та мереж, виявлено переваги і недоліки базових методів та їх модифікацій. Розглянуто сутність методів парних порівнянь розрахунку ваг, які є складовими МАІ та методу аналізу мереж (МАМ), виявлено невирішені проблеми. Перевагами МАІ та МАМ є можливість структуризації складної проблеми у вигляді ієрархії або мережі та процедура парних порівнянь, яка в повній мірі враховує психофізіологічні особливості людини. Наведено огляд методів оцінювання та підвищення узгодженості експертних оцінок парних порівнянь. Встановлено необхідність у дослідженні питання надійності ваг, обчислених на основі МПП різного рівня узгодженості. Виявлено доцільність розрахунку довірчих інтервалів для ваг на основі МПП.

Виконано огляд і аналіз модифікацій МАІ та МАМ, які використовують теорію нечітких множин. Перевага цих модифікацій полягає у тому, що ваги елементів моделі можна розрахувати на основі лінгвістичних оцінок експерта. Також стає можливим математично описати неточність і невизначеність суджень, які використовуються експертами в якості оцінок. Серед обмежень нечітких методів – питання вибору вигляду і параметрів функцій приналежності елементів нечіткої МПП. Встановлена необхідність у розробці методів та засобів оцінювання рівня узгодженості експертних оцінок парних порівнянь, представлених нечіткими множинами, допустимості неузгодженості цих оцінок для достовірного розрахунку локальних ваг на їх основі, а також методів підвищення узгодженості таких оцінок.

Огляд засобів аналізу чутливості результатів, отриманих МАІ та МАМ, показав доцільність удосконалення комплексного методу оцінювання чутливості результатів шляхом розробки етапів оцінювання чутливості локального ранжування альтернатив рішень до збурень в оцінках експерта та оцінювання чутливості узгодженості множини експертних оцінок до зміни окремих оцінок, що дозволить знайти найбільш чутливі та стійкі елементи задачі.

Показано, що МАІ і МАМ знайшли дуже широке практичне використання для багатьох задач підтримки прийняття рішень практично в усіх предметних областях.

МАІ і МАМ займають важливе місце в методології сценарного аналізу розв'язання задач передбачення. Ці методи, зокрема, використовувалися для оцінювання вигід від використання технологій транспортування на водневому паливі, перспектив використання синтетичного палива для транспорту, оцінювання наслідків розміщення національної системи протиракетної оборони США, планування дій виробника споживчої продукції, вибору найкращого варіанту альянсу між банком і страховими компаніями, в різних задачах оцінювання сценаріїв і вибору варіантів на виробництві та в задачах сталого розвитку.

Також МАІ і МАМ знайшли широке використання в економіці, фінансах та банківській справі, зокрема для встановлення процентних ставок за банківськими депозитами, при ціновій оцінці банківських вкладів, оцінці кредитного ризику, визначенні базової ставки кредиту, оцінюванні інтелектуальних активів, акредитивів, інвестиційних проєктів, при прийнятті рішень щодо маркетингових стратегій банку, рішень про злиття, а також для прогнозування цін акцій та опціонів. МАІ, як доповнення до інших методів, використовується в діяльності інвестиційних

та консалтингових компаній, а також команд з антикризового управління підприємствами, при розв'язанні задач багатокритеріального аналізу кредитоспроможності підприємств, оцінювання банкрутства підприємства, підвищення ефективності управління капіталом на підприємстві, пошуку ефективних шляхів реструктуризації та інвестування неплатоспроможних підприємств в умовах невизначеності, оцінюванні інвестиційних проєктів, при виборі стратегії фірми. Традиційні системи рейтингової оцінки банків CAMEL та управління кредитним ризиком Basel II в останній час об'єднуються з MAI та MAM і вважається, що таке об'єднання дає більше інформації для якісного прийняття рішень. MAI застосовується при проведенні бенчмаркінгу. Використовуються поєднання MAI з методами розгортання функції якості QFD, balanced scorecard та комплексного аналізу даних DEA.

Огляд програмного забезпечення, в якому в тій чи іншій мірі реалізовано методи аналізу ієрархій або мереж, показує, що існуючий інструментарій має ряд обмежень. Зокрема, недостатньо засобів для підвищення узгодженості чітких і нечітких оцінок, отриманих від експерта; не розраховуються інтервали довіри до локальних і агрегованих ваг; недостатньо реалізовані методи знаходження локальних і агрегованих ваг на основі нечітких експертних оцінок; недостатньо засобів для аналізу чутливості та стійкості отриманих результатів. Наведений огляд досліджень з питань розв'язання задач підтримки прийняття рішень на основі аналітичних ієрархій та мереж свідчить про важливість цього напрямку.

У зв'язку з цим, в дисертаційній роботі сформульовано *важливу науково-технічну проблему* розробки моделей, методів та на їх основі інструментарію підтримки прийняття рішень, які дозволять підвищити достовірність розв'язків задач ППР в складних слабо структурованих системах на основі ієрархічних та мережевих моделей. Загальна постановка задачі формулюється наступним чином.

Нехай задана мережева модель задачі ППР у вигляді направленого графу $S = \{V, L, E, PCM\}$, де V – множина вершин графу – кластери з елементами задачі ППР, такими як критерії, альтернативи рішень, цілі, політики акторів, сценарії та інші: $V = \{C_1, C_2, \dots, C_N\}$, $C_i = \{v_{i1}, \dots, v_{in_i}\}$; L – множина направлених ребер графу; E – множина оцінок елементів графу, наданих експертом в шкалі, та особисті якості експерта, такі як реаліст, песиміст або оптиміст; PCM – множина обернено симетричних МПП елементів графу. Для вирішення сформульованої вище науково-технічної проблеми потрібно *розв'язати такі завдання*: оцінити і підвищити узгодженість МПП загального виду, знайти найбільш неузгоджені експертні оцінки, виконати підвищення узгодженості МПП без участі експерта; розрахувати довірчі інтервали для локальних ваг елементів моделі; розрахувати нечіткі локальні ваги елементів моделі на основі нечітких МПП; розрахувати агреговані ваги та значення комбінованої функції довіри до елементів моделі; оцінити чутливість локального та глобального ранжувань елементів моделі; оцінити ефективність розроблених методів.

Другий розділ присвячено розробці методологічного та математичного забезпечення оцінювання ієрархічних та мережевих моделей ППР. Описано розроблену методологію підтримки прийняття рішень в складних слабо структурованих системах на основі ієрархічних та мережевих моделей. Наведено структурну схему системного підходу, запропонованого на основі цієї методології (рис.1).

Для задач, які розв'язуються кількісними методами, достовірність розуміється як ступінь наближення, відповідності між дійсними кількісними відношеннями та їх відображенням в показниках. Даний підхід не може бути використаний для оцінювання достовірності розв'язків, отриманих методами якісного аналізу ієрархій і мереж для конкретної практичної слабко структурованої задачі ППР, оскільки для такої задачі істинний розв'язок невідомий. *Оцінювання достовірності розв'язків практичних задач ППР*, отриманих на основі ієрархічних та мережевих моделей, в даній роботі включає оцінювання достовірності вхідних експертних оцінок за показниками узгодженості та оцінювання стійкості отриманих ранжувальних елементів моделі. *Підвищення достовірності вхідних експертних оцінок* при розв'язанні практичної задачі ППР має місце за рахунок використання пропонованого в роботі більш ефективного методу оцінювання і підвищення узгодженості цих оцінок. *Ефективність методу* перевіряється шляхом моделювання множин тестових задач ППР і співставленням з відомими розв'язками тестових задач. Ефективність вимірюється значенням віддаленості вектору розрахованих ваг від вектору реальних ваг, який генерується в процесі моделювання. *Достовірність розв'язку* практичної задачі ППР також підвищується шляхом розрахунку нечітких ваг та довірчих інтервалів для ваг, на відміну від точкових ваг, розрахованих відомими методами. Стійкість розв'язку оцінюється пропонованими індексами стійкості та чутливості.

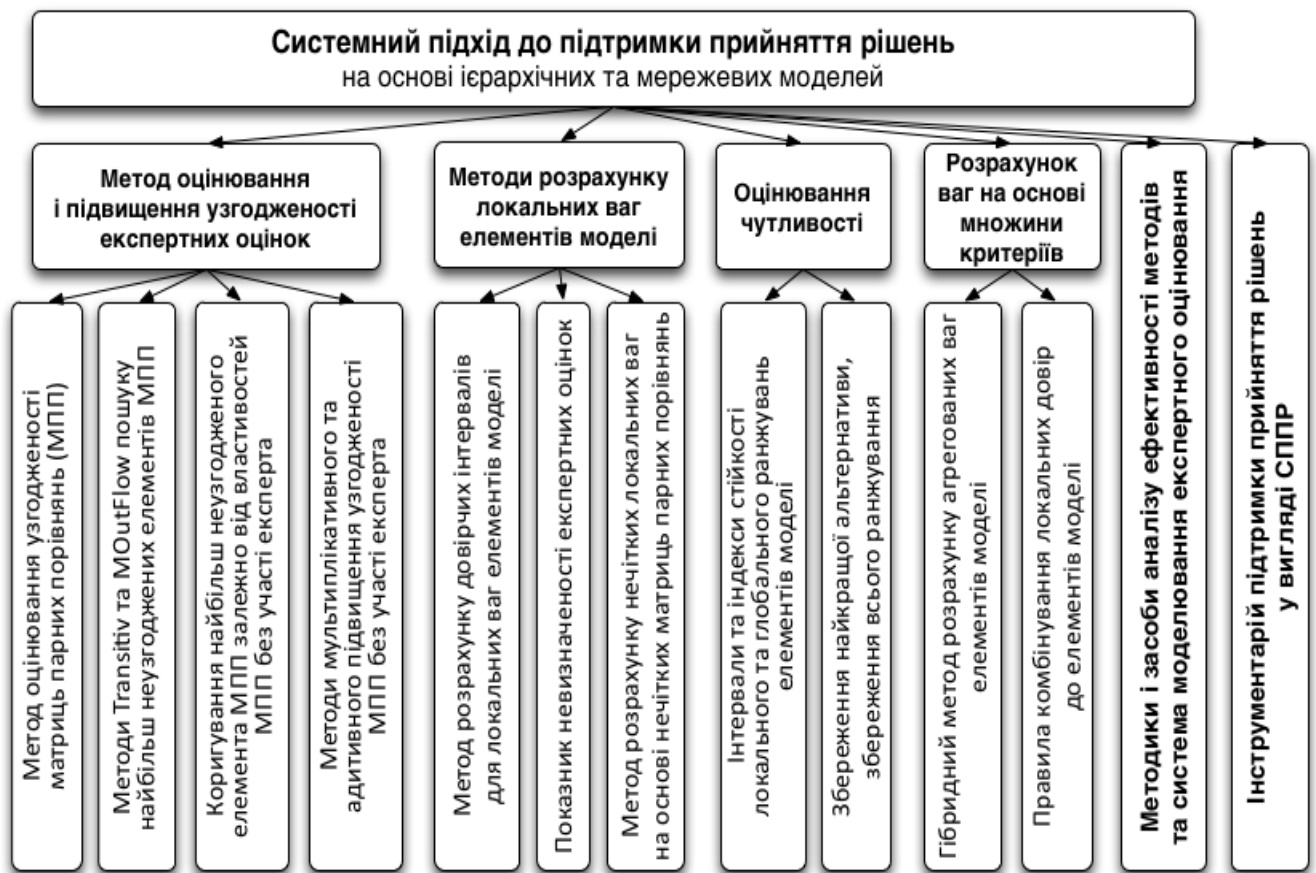


Рис.1. Структурна схема системного підходу до підтримки прийняття рішень на основі ієрархічних та мережевих моделей

Перейдемо до розгляду пропонованої методології підтримки прийняття рішень. На першому етапі аналізу якості оцінок, отриманих від експерта, запропоновано метод оцінювання і підвищення узгодженості оцінок (рис.2). Особливості цього методу полягають у дослідженні властивості слабкої неузгодженості, присутності циклів в МПП та у пошуку найбільш неузгодженого елементу цієї матриці. Метод може застосовуватися до оцінювання і підвищення узгодженості МПП різних видів, зокрема мультиплікативних, адитивних, нечітких та інших.

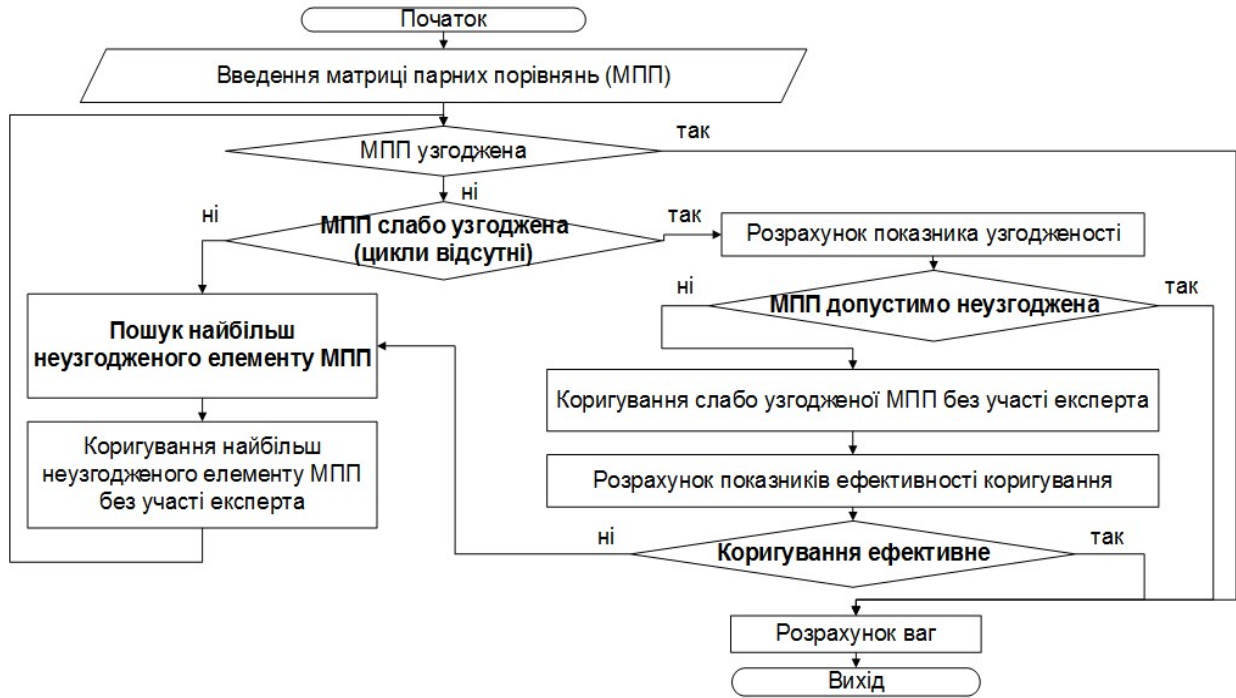


Рис.2. Структурна схема загального алгоритму методу оцінювання і підвищення узгодженості експертних оцінок

Нехай G – відкритий інтервал R_+^1 , $G = (G, \otimes, \leq)$ – абелева лінійно впорядкована група, e – одиниця в G , $x^{(-1)}$ – симетричний до $x \in G$ відносно операції \otimes , $D = \{(d_{ij}) \mid i, j = 1, \dots, n\}$ – \otimes -обернено симетрична МПП над групою G .

Пропонований метод оцінювання і підвищення узгодженості МПП складається з етапів:

1. Перевірити \otimes -узгодженість МПП над G . Якщо вона виконується, то вихід.
2. В іншому випадку, якщо $(d_{ij} > e) \wedge (d_{jk} > e) \Rightarrow (d_{ik} > e)$,

$$(d_{ij} = e) \wedge (d_{jk} > e) \Rightarrow (d_{ik} > e), (d_{ki} > e) \wedge (d_{ij} = e) \Rightarrow (d_{kj} > e),$$

$$(d_{ij} = e) \wedge (d_{jk} = e) \Rightarrow (d_{ik} = e), \text{ то } D \text{ – це } \otimes\text{-слабо узгоджена МПП над } G.$$

Перевірити допустимість неузгодженості МПП.

МПП $D \in \otimes$ -допустимо неузгодженою над G т.т.к. індекс неузгодженості не перевищує встановленого порогового значення:

$$ConsInd(D) = \left(\bigotimes_{i < k < j} dist(d_{ij}, d_{ik} \otimes d_{kj}) \right)^{\frac{6}{n(n-1)(n-2)}} < \delta. \quad (1)$$

Якщо $D \in \otimes$ -допустимо неузгодженою над G , тоді вихід. В іншому випадку:

- 2.1. Виконати коригування \otimes -слабко узгодженої МПП без участі експерта.
- 2.2. Розрахувати показники ефективності коригування. Якщо коригування ефективне, тоді вихід, інакше перейти на крок 3.1.
3. В іншому випадку, якщо $\exists(i, j, k) : (d_{ij} > e) \wedge (d_{jk} > e) \wedge (d_{ik} \leq e)$ або $(d_{ij} = e) \wedge (d_{jk} > e) \wedge (d_{ik} \leq e)$, або $(d_{ki} > e) \wedge (d_{ij} = e) \wedge (d_{kj} \leq e)$, або $(d_{ij} = e) \wedge (d_{jk} = e) \wedge (d_{ik} \neq e)$, або $(d_{ij} < e) \wedge (d_{jk} < e) \wedge (d_{ik} \geq e)$, то трійка (i, j, k) є циклом в МПП D , і D не є \otimes -слабко узгодженою над G . Тоді:
 - 3.1. Знайти найбільш неузгоджений елемент $d_{i^*j^*}$ в МПП методами *Transitiv* або *MOutflow*.
 - 3.2. Виконати коригування елемента $d_{i^*j^*}$ в напрямку підвищення узгодженості МПП D .
4. Перейти на крок 1.

Розроблено удосконалений метод потоків *MOutflow*, який відрізняється від існуючого методу врахуванням вхідного потоку та можливістю використання для МПП загального виду. Метод *MOutflow* складається з етапів:

1. Обчислюються значення вхідного Φ_i^- і вихідного Φ_i^+ потоків для альтернативи a_i , $i=1,2,\dots,n$, де Φ_i^+ – це кількість альтернатив a_j , таких що a_i переважає a_j , а саме $d_{ij} > e$. Φ_i^- – це кількість альтернатив a_j , таких що a_j переважає a_i , а саме, $d_{ji} > e$.

2. Визначається найбільш неузгоджений елемент $d_{i^*j^*}$ МПП з умови

$$d_{i^*j^*} : \max_{i,j} (\max(\Phi_j^+ - \Phi_i^+, \Phi_i^- - \Phi_j^-)), \text{ якщо } i \neq j, d_{ij} > e.$$

Якщо останній умові задовольняють декілька елементів $d_{i^*j^*}$, серед них шукається той, що приводить до більшої неузгодженості – елемент, на якому досягається максимальне значення виразу:

$$\gamma_{ij} = \frac{1}{n-2} \sum_{k=1}^n (\ln d_{i,j} - \ln(d_{i,k} d_{k,j})), \text{ де } k \neq i \neq j. \quad (2)$$

Для пошуку найбільш неузгодженого елемента мультиплікативної МПП розроблено метод *Transitiv*, який складається з етапів:

1. Будується множина транзитивностей $\Gamma = \{\Gamma_u\}$, $\Gamma_u = \{d_{ij}, d_{jk}, d_{ik}\}$, $u=1,\dots,NT$, $NT = n!/((n-3)3!)$, $i, j, k=1,\dots,n$, $i < j < k$, $n \geq 3$.
2. На основі Γ_u будуються матриці спеціального виду і обчислюються значення їх визначників: $\det(\Gamma_u) = d_{ij}d_{jk}/d_{ik} + d_{ik}/(d_{ij}d_{jk}) - 2$.
3. Для кожної пари (i, j) знаходяться значення $S_{i,j} = \sum_{k=1}^n (d_{ij}d_{jk}/d_{ik} + d_{ik}/(d_{ij}d_{jk}) - 2)$.
4. Визначаються індекси найбільш неузгодженого елемента $d_{i^*j^*}$ з умови

$$(i^*, j^*) = \arg \max_{i,j} S_{i,j}.$$

Якщо останній умові задовольняють декілька елементів $d_{i^*j^*}$, то серед них шукається елемент, на якому досягається максимальне значення виразу (2).

Етап коригування без участі експерта найбільш неузгодженого елемента $d_{i^*j^*}$. МПП полягає у пошуку нового значення шкали для $d_{i^*j^*}$, яке забезпечує мінімальне значення показника неузгодженості всієї матриці:

$$d_{i^*j^*} := x^*, d_{j^*i^*} := (x^*)^{-1}, x^* \in Scale,$$

$$x^* = \arg \min_{x \in Scale} ConsInd(D^{cor}, x),$$

де $ConsInd(D^{cor}, x)$ – індекс неузгодженості (1) для скоригованої МПП D^{cor} , в якій $d_{ij}^{cor} = d_{ij} \forall i, j$, крім $d_{i^*j^*}^{cor} = x$, $d_{j^*i^*}^{cor} = (x)^{-1}$, $Scale = \{1/9, 1/8, \dots, 1/2, 1, 2, \dots, 8, 9\}$.

Якщо МПП \otimes -слабко узгоджена, тобто цикли відсутні, але не є \otimes -допустимо неузгодженою в сенсі показника неузгодженості, здійснюється коригування всіх елементів матриці до досягнення допустимої неузгодженості.

В частковому випадку мультиплікативної МПП аналітично доведено наступні дві теореми, які показують, що при використанні мультиплікативного та адитивного методів коригування рівень неузгодженості скоригованої МПП не перевищує рівень неузгодженості МПП до коригування.

Теорема (мультиплікативне коригування). Нехай $D_{n \times n}^* = (d_{ij}^*)$, $d_{ij}^* = (d_{ij})^\alpha (\frac{w_i}{w_j})^{1-\alpha}$ – скоригована МПП, де $\alpha \in (0,1)$ – параметр коригування. Тоді $CI^* \leq CI$, $GCI^* \leq GCI$, $HCI^* \leq HCI$ та $CI^{tr*} \leq CI^{tr}$, де CI^* , GCI^* , HCI^* і CI^{tr*} – відповідно традиційний, геометричний, гармонічний індекси узгодженості та індекс узгодженості транзитивностей скоригованої МПП $D_{n \times n}^*$; CI , GCI , HCI і CI^{tr} – індекси узгодженості початкової МПП $D_{n \times n}$; рівності $CI^* = CI$, $GCI^* = GCI$, $HCI^* = HCI$ і $CI^{tr*} = CI^{tr}$ виконуються тоді і тільки тоді, коли $D_{n \times n}$ узгоджена.

Теорема (адитивне коригування). Нехай $D_{n \times n}^* = (d_{ij}^*)$ – скоригована МПП, де $d_{ij}^* = \alpha d_{ij} + (1-\alpha)(\frac{w_i}{w_j})$, якщо $i < j$ і $d_{ij}^* = (\alpha d_{ji} + (1-\alpha)(\frac{w_j}{w_i}))^{-1}$, якщо $i \geq j$, $\alpha \in (0,1)$ – параметр коригування. Тоді $CI^* \leq CI$, $GCI^* \leq GCI$, $HCI^* \leq HCI$ та $CI^{tr*} \leq CI^{tr}$; рівності $CI^* = CI$, $GCI^* = GCI$, $HCI^* = HCI$ і $CI^{tr*} = CI^{tr}$ виконуються тоді і тільки тоді, коли $D_{n \times n}$ узгоджена.

Сформульовані вище і доведені теореми показують, що використання мультиплікативного і адитивного коригувань призводить до покращення узгодженості МПП за показниками CR, GCI, HCR та CI^{tr} .

Ці теореми лягли в основу пропонованого способу підвищення узгодженості МПП, який складається з етапів:

1. Задати значення параметра α , $0 < \alpha < 1$. Обчислити значення показників CR, GCI, HCR та CI^{tr} МПП D .
2. В циклі, поки $CR > CR^{porog}$ і $GCI > GCI^{porog}$ і $HCR > HCR^{porog}$ і $CI^{tr} > CI^{tr porog}$:

2.1. Обчислити ваги $w = (w_1, \dots, w_n)^T$ на основі МПП D .

2.2 Обчислити скориговану МПП $D^* = (d_{ij}^*)$, використовуючи мультиплікативне або адитивне коригування.

2.3 Обчислити значення показників CR , GCI , HCR та CI^r МПП $D^* \cdot D := D^*$.

Результати моделювання на множині тестових задач ППР показали, що розроблений метод оцінювання і підвищення узгодженості експертних оцінок (див.рис.2), методи *Transitiv* і *MOutflow* пошуку найбільш неузгоджених елементів МПП є більш ефективними за існуючі методи. Застосування розробленого методу оцінювання і підвищення узгодженості дозволяє для всіх елементів мережевої моделі ППР отримати експертні оцінки прийнятної якості, які використовуються на наступному етапі для знаходження локальних ваг елементів моделі.

Далі в розділі 2 наводиться пропонований метод оцінювання і підвищення узгодженості нечіткої матриці парних порівнянь (НМПП). НМПП виникає в задачах, де експерт, виконуючи парні порівняння n альтернатив рішень, надає оцінки ступеня переваги однієї альтернативи над іншою в нечіткому виді, наприклад, "величина переваги між слабкою і дуже слабкою" або "величина переваги близька до сильної". НМПП також може бути результатом оцінювання альтернатив рішень групою експертів. Нехай $D(k)$ – МПП, надана k -м експертом, $k=1, \dots, m$. Результатом агрегування множини МПП $\{D(k) \mid k=1, \dots, m\}$ можна розглядати нечітку МПП $\tilde{D} = \{(\tilde{d}_{ij})\}$, у якої \tilde{d}_{ij} – дискретне нечітке число, яке відображає розподіл значень серед елементів $d_{ij}(k)$ множини МПП $\{D(k) \mid k=1, \dots, m\}$.

Розділ 3 присвячено розробці методів розрахунку локальних ваг елементів моделі ППР. Запропоновано удосконалений метод розрахунку нормованих нечітких локальних ваг елементів моделі на основі НМПП, який відрізняється від відомих етапами оцінювання і підвищення узгодженості НМПП, оцінювання допустимості неузгодженості для розрахунку ваг, оцінювання властивостей сильного і слабого збереження порядку на множині розрахованих ваг та коригування НМПП для досягнення цих бажаних властивостей (рис.3). Нехай $\tilde{D} = \{(\tilde{d}_{ij}) \mid i, j=1, \dots, n\}$ – обернено симетрична НМПП n альтернатив рішень, де нечітка множина $\tilde{d}_{ij} = (x, \mu_{ij}(x))$ відображає інтенсивність переваги альтернативи a_i над альтернативою a_j , $x \in \mathfrak{R}$, $\mu_{ij}(x)$ – значення функції приналежності для нечіткого відношення переваги альтернативи a_i над альтернативою a_j , $\tilde{d}_{ii} = 1$.

На етапі оцінювання і підвищення узгодженості НМПП використовується розроблений в розділі 2 метод, який має два загальних етапи:

1. Побудувати дефазифіковану МПП $D = \{(d_{ij})\} \in R_{n \times n}^+$, де $d_{ij} = \text{Defuz}(\tilde{d}_{ij})$, якщо $\tilde{d}_{ij} \geq 1$ і $d_{ij} = 1/d_{ji}$ інакше, $i, j=1, \dots, n$.
2. Виконати оцінювання і підвищення узгодженості МПП D , використовуючи метод, запропонований вище для чіткої МПП.

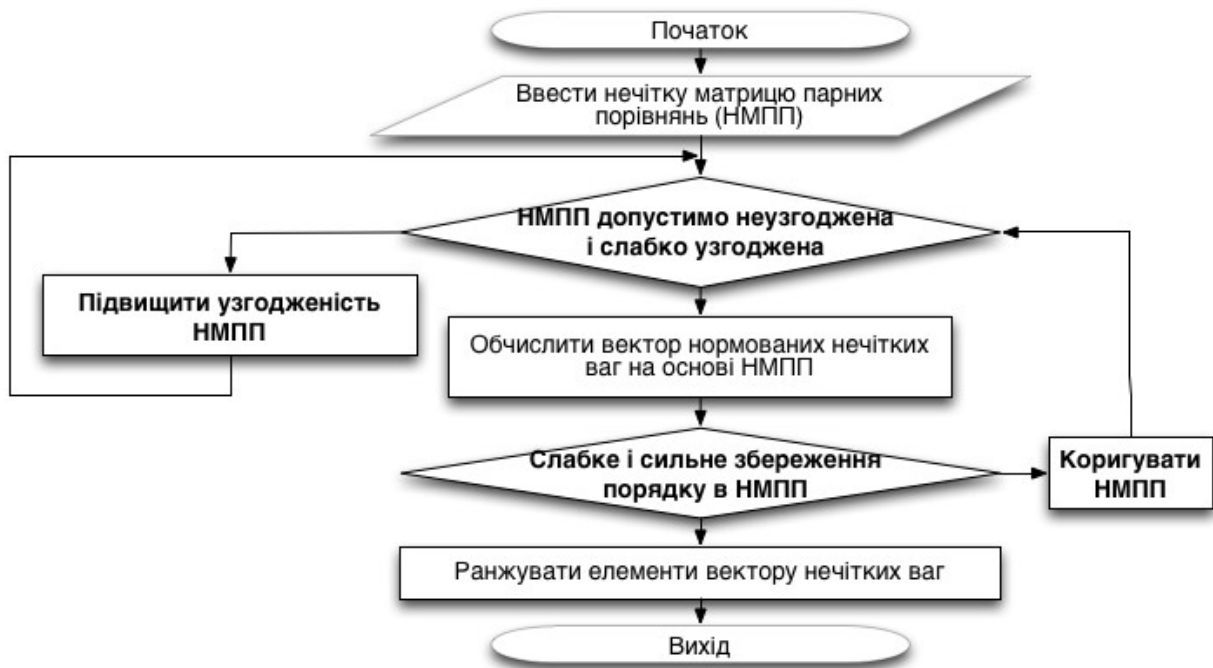


Рис.3. Структурна схема методу розрахунку нечітких локальних ваг на основі нечітких матриць парних порівнянь

Удосконалений метод розрахунку нечітких локальних ваг на основі НМПП використовує декомпозиційне представлення НМПП на множини ІМПП, що дозволяє працювати з функціями приналежності будь-якого вигляду. Модель GPM, яка використовується на етапі розрахунку нормованих нечітких ваг, є більш ефективною в порівнянні з іншими методами і моделями (див. розділ 5). Властивості сильного і слабого збереження порядку в основному дозволяють виявити цикли і найбільш неузгоджені елементи в слабо неузгоджених НМПП. Коригування цих елементів виключає порушення порядку в результуючих нечітких вагах $\{\tilde{w}_i\}$ і, як наслідок, підвищує достовірність отриманих результатів. *Переваги пропонованого методу оцінювання і підвищення узгодженості НМПП наступні:*

- на відміну від існуючих, дозволяє визначити слабку узгодженість НМПП та оцінити допустимість неузгодженості НМПП для обчислення ваг,
- на відміну від відомих методів, дозволяє відносно легко реалізувати підвищення узгодженості НМПП, знаходити найбільш неузгоджені елементи і цикли в НМПП, використовуючи апарат, розроблений для чітких МПП,
- не виникає протиріч між результатами за чіткою і відповідною їй нечіткою МПП, на відміну від відомих методів, які використовують розширені бінарні арифметичні операції; зокрема, не виникає протиріч в окремому випадку $n=2$,
- застосовується до НМПП з будь-якими типами елементів (трапецевидними, гаусівськими, а також дискретними нечіткими множинами).

При використанні нечітких методів залишається невирішеною проблема вибору вигляду і параметрів функцій приналежності. Використання різних функцій приналежності на основі однієї і тієї ж множини експертних оцінок парних порівнянь призводить в результаті до різних нечітких ваг. Результуючі ваги

характеризуються більшою невизначеністю (шириною), якщо вхідні експертні оцінки формалізовано нечіткою множиною з більшим ступенем нечіткості. Цього недоліку позбавлений наступний оригінальний авторський метод *розрахунку довірчих інтервалів для локальних ваг*. В його основу покладено твердження, що оцінки експерта лише в деякій мірі відображають реальні співвідношення між вагами елементів моделі і містять невизначеність, незалежно від рівня їх узгодженості. Припускається, що невизначеність оцінок експерта обумовлена шкалою, в якій експерт виконує оцінювання, і такими особистими його якостями, як реалізм, песимізм та оптимізм. *Експертом-реалістом* вважається експерт, який дає оцінки в шкалі, найбільш близькі до реальних співвідношень між порівнюваними елементами. Оцінки *експертів-песиміста та оптиміста* незначно (на одну поділку шкали) занижені або завищені в порівнянні з реальними значеннями.

Метод розрахунку довірчих інтервалів використовує апарат теорії довіри або свідчень Демпстера-Шейфера і результати комп'ютерного моделювання суджень експерта. Нехай $\Theta = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ – фрейм розрізнення – множина альтернатив рішень, $S = \{S_i\}$ – множина гіпотез, $D = \{d_{ij} \mid i, j = 1, \dots, n\}$ – експертна МПП альтернатив $a_i \in \Theta$. Базові довіри $m_i = m(\{a_i\})$ до одно-елементних гіпотез $S_i = \{a_i\}$ відповідають вагам альтернатив a_i , а базова довіра $m(\Theta)$ до множини, яка містить усі альтернативи, як довіра до гіпотези, що усі альтернативи нерозрізнені експертом або мають однакову важливість для експерта, пропонується використовувати для вираження представлення рівня невизначеності експертних оцінок.

Означення. Функцію $m : S \rightarrow [0, 1]$ базової довіри до гіпотез визначено:

$$m(S_i) = m_i = v_i / \left(X + \sum_{j=1}^n v_j \right) \text{ для } S_i = \{a_i\}, \quad i = 1, \dots, n,$$

$$m(S_i) = 0 \text{ для всіх інших } S_i \in S, \quad S_i \neq \Theta,$$

де $v_i > 0$ – ненормована вага a_i на основі МПП D , $X > 0$ – ненормований показник рівня невизначеності оцінок експерта.

Означення. Нормований показник рівня невизначеності експертних оцінок визначено як значення базової довіри до усієї множини альтернатив:

$$m_{\Theta} = X / \left(X + \sum_{j=1}^n v_j \right),$$

Показник X побудовано як відсоток від суми ваг $\sum_j v_j$ таким чином:

- якщо експертні оцінки повністю узгоджені, то $X = X_1 = k_1 \sum_{j=1}^n v_j$, де параметр $k_1 \in (0, 1)$ моделює невизначеність, яку вносить шкала Сааті, а також невизначеність внаслідок особистих якостей експерта, таких як песимізм і оптимізм;
- якщо в експертних оцінках присутня неузгодженість, то рівень невизначеності збільшується мультиплікативно відповідно до значення показника неузгодженості CI МПП, узятого з деяким коефіцієнтом $k_2 > 0$: $X = X_1(1 + k_2 \cdot CI)$.

Властивості: $m(\emptyset) = 0$, $\sum_{S_i \in S} m(S_i) = 1$.

Твердження. Нехай D – МПП альтернатив a_1, a_2, \dots, a_n . Тоді довірчий інтервал для локальної ваги альтернативи a_i :

$$[Bel_i, Pls_i] = [m_i, m_i + m_\Theta], \quad i = 1, \dots, n, \quad (3)$$

$$m_i = v_i / \left((1 + k_1 \cdot (1 + k_2 \cdot CI)) \sum_{j=1}^n v_j \right), \quad m_\Theta = k_1 \cdot (1 + k_2 \cdot CI) / (1 + k_1 \cdot (1 + k_2 \cdot CI)),$$

де m_i – значення повної довіри до a_i , яке в даному випадку співпадає із значенням функції базової довіри до a_i , m_Θ – нормований показник рівня невизначеності оцінок експерта, v_i – ненормована вага a_i на основі МПП D , CI – показник узгодженості МПП D , $k_1 \in (0,1)$, $k_2 > 0$.

Твердження. Локальна вага альтернативи a_i , розрахована методом аналізу ієрархій Сааті, міститься у довірчому інтервалі $[Bel_i, Pls_i] = [m_i, m_i + m_\Theta]$, $i = 1, \dots, n$.

Розглянемо граничний випадок: шкала, в якій експерт виконує парні порівняння – це множина R_+^n . Елементи МПП, побудованої на основі експертних оцінок в цій шкалі: $d_{ij} \in R_+^n$. Наступне твердження показує, що ваги w_i^{real} містяться в довірчих інтервалах (3), побудованих пропонуваним методом на основі узгодженої МПП D^{real} . Це твердження обґрунтовує коректність розробленого методу.

Твердження. Нехай $v^{real} \in R_+^n$ – вектор ненормованих ваг n альтернатив, $D = \{d_{ij} = v_i^{real} / v_j^{real} \mid i, j = 1, \dots, n\}$ – МПП, $w^{real} = v^{real} / \sum_k v_k^{real}$ – вектор нормованих ваг, $I = \{[Bel_i, Pls_i] \mid i = 1, \dots, n\}$ – довірчі інтервали (3) для ваг альтернатив на основі МПП D . Тоді $w_i^{real} \in [Bel_i, Pls_i]$ для всіх $i = 1, \dots, n$.

Нехай $D = \{(d_{ij}) \mid i, j = 1, \dots, n\}$ – \otimes -обернено симетрична МПП в шкалі Сааті над абелевою лінійно впорядкованою групою $G = (G, \otimes, \leq)$. Відомі особисті якості експерта (реаліст, песиміст або оптиміст). Метод складається з етапів:

1. Розрахувати ненормовані локальні ваги v_i на основі МПП D : $v_i = \left(\bigotimes_{k=1, \dots, n} d_{ik} \right)^{1/n}$.
2. Розрахувати показник узгодженості CI для МПП D .
3. Визначити значення параметру $k_1 \in (0,1)$ залежно від особистих якостей експерта та шкали та параметру $k_2 > 0$.
4. Розрахувати довірчі інтервали (3) для ваги альтернативи a_i , $i = 1, \dots, n$.

На основі розв'язання великої кількості тестових задач різної розмірності побудовано таблиці оцінок параметрів методу залежно від кількості порівнюваних елементів та особистих якостей експерта для мультиплікативного випадку. Комп'ютерне моделювання дозволило за деяких умов отримати кількісні оцінки невизначеності суджень експертів реаліста, песиміста і оптиміста в задачі обчислення ваг методом парних порівнянь у шкалі Сааті.

Параметр $k_1(n)$ визначено на основі оцінки $\hat{p}_1 = \hat{p}_1^{0.90}(n)$ величини $p_1(l) = \|w(l) - w^{real}(l)\|_\infty$ чебишевської норми відхилення вектору відомих в ході

модельовання нормованих ваг $w^{real}(l)$ від ваг $w(l) = v(l) / \sum_k v_k(l)$, обчислених на основі згенерованої МПП $D^*(l)$:

$$k_l = k_{11} \cdot \hat{p}_l,$$

де $\hat{p}_l = \hat{p}_l^{0.90}(n) = \hat{p}_l^{cp}(n) + 1.3\sigma(p_l(n))$ – значення чебишевської норми, таке, що для 90% модельованих МПП $D^*(l)$ виконується нерівність $p_l(l) \leq \hat{p}_l^{0.90}(n)$ (табл.1), l – номер експерименту, $l = 1, \dots, 10^5$, $k_{11}(n) > 0$.

Значення коефіцієнта $k_{11} = k_{11}(n)$ підібрано емпірично так, щоб в 90% експериментів всі координати відомого в ході модельовання вектору нормованих ваг $w^{real}(l)$ містилися в своїх довірчих інтервалах, $w_i^{real} \in [Bel_i, Pls_i]$, $i = 1, 2, \dots, n$ (табл.2).

Значення \hat{m}_Θ , отримані в табл.2 для мультиплікативних МПП, свідчать про те, що за вказаних умов рівень невизначеності експертних оцінок в задачі обчислення ваг зменшується із зростанням кількості альтернатив n . Як наслідок, із зростанням n зменшується ширина довірчих інтервалів (3). *Пропоновані довірчі інтервали більш достовірно відображають реальні ваги, невідомі при розв'язанні практичної задачі ППР, порівняно з точковими вагами, які розраховано традиційним методом головного власного вектору аналізу ієрархій.*

Таблиця 1. Оцінки значень параметра p_l для експертів реаліста, песиміста та оптиміста (мультиплікативна МПП)

n	3	4	5	6	7	8	9
$\hat{p}_l^{realist}$	0.054	0.046	0.039	0.033	0.025	0.021	0.017
\hat{p}_l^{pessim}	0.126	0.105	0.088	0.073	0.064	0.056	0.050
\hat{p}_l^{optim}	0.106	0.095	0.084	0.072	0.064	0.056	0.050

Таблиця 2. Оцінки значень коефіцієнта k_{11} і відповідні їм вибіркові середні значення \hat{m}_Θ показника невизначеності: а) експерт-реаліст, б) експерт-песиміст (мультиплікативна МПП)

а)	n	3	4	5	6	7	8	9
	$k_{11}^{0.89500}$ для $m=89.500\%$	2.325	2.800	3.313	3.830	4.730	5.375	5.975
	$k_{11}^{0.90499}$ для $m=90.499\%$	2.370	2.845	3.370	3.893	4.810	5.470	6.083
	\hat{m}_Θ для $k_{11}^{0.89500}$	0.113	0.115	0.115	0.112	0.106	0.100	0.094
	\hat{m}_Θ для $k_{11}^{0.90499}$	0.115	0.117	0.117	0.114	0.108	0.102	0.096

б)	n	3	4	5	6	7	8	9
	$k_{11}^{0.89500}$ для $m=89.500\%$	3.570	4.391	5.15	5.98	6.78	7.60	8.210
	$k_{11}^{0.90499}$ для $m=90.499\%$	3.68	4.491	5.25	6.08	6.89	7.71	8.328
	\hat{m}_Θ для $k_{11}^{0.89500}$	0.319	0.324	0.319	0.313	0.309	0.307	0.301
	\hat{m}_Θ для $k_{11}^{0.90499}$	0.326	0.329	0.324	0.317	0.313	0.310	0.304

Практичне використання розробленого методу розрахунку довірчих інтервалів потребує знання якостей експерта: реаліст, песиміст або оптиміст. Пропонується базова ієрархічна модель оцінювання вказаних якостей, елементи якої – методи оцінювання якостей експерта (рис.4). Використовуючи метод аналізу ієрархій, проводиться оцінювання конкретного експерта за елементами цієї моделі і вибирається якість, яка має найбільшу агреговану вагу.

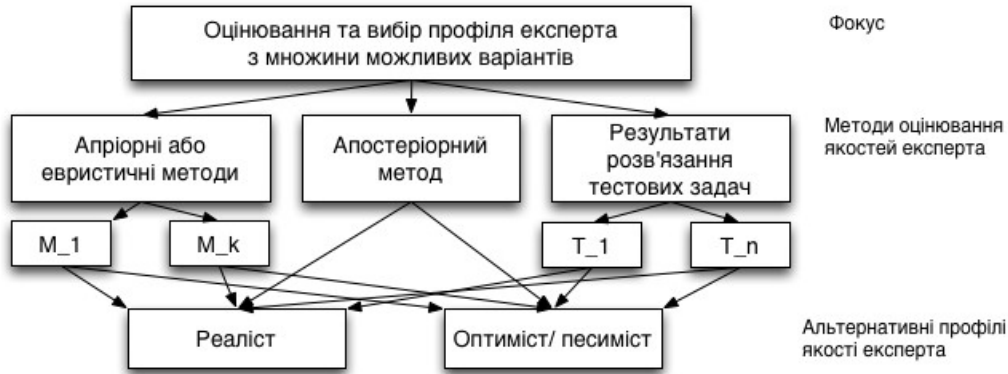


Рис. 4. Базова ієрархічна модель оцінювання якостей експерта

Після розрахунку локальних ваг ставиться задача оцінювання чутливості локального ранжування на основі цих ваг до збурень в оцінках експерта.

Означення. Інтервалом стійкості (SInt) для елемента d_{ij} МПП названо:

$$SInt_{ij} = RSInt_{ij} \cap CSInt_{ij},$$

де $RSInt_{ij}$ – інтервал стійкості для d_{ij} , який зберігає локальне ранжування – діапазон, в межах якого може змінюватися оцінка експерта d_{ij} так, щоб локальне ранжування альтернатив залишалось незмінним, $CSInt_{ij}$ – інтервал стійкості, який зберігає узгодженість МПП.

Означення. Індекс стійкості локального ранжування для елемента d_{ij} МПП D :

$$\delta_{ij} = \min((SInt_{ij})^{-1}, \overline{SInt_{ij}}).$$

Пропонований метод оцінювання чутливості локального ранжування полягає у розрахунку індексів стійкості для всіх елементів МПП і базується на двох теоремах, наведених нижче. Досліджено два випадки: чи залишається незмінною найкраща альтернатива рішень та чи залишається незмінним ранжування всіх альтернатив.

Теорема (про збереження найкращої альтернативи). Нехай альтернативи перенумеровані в порядку спадання їх важливості, виконується $v_i > v_j$ для $i < j$, де v_i – локальні ваги, розраховані методом RGMM і R – ранжування, побудоване на основі v_i , $i = 1, \dots, n$. Тоді інтервал стійкості $RSInt_{1j} = (\underline{d}_{1j}, \overline{d}_{1j}]$ для оцінки експерта d_{1j} , $j \neq 1$, такий що не змінюється найкраща альтернатива a_1 в R , дорівнює:

$$\underline{d}_{1j} = \max(L_j^1, L_j^2), \quad \overline{d}_{1j} = 9, \quad \text{де } L_j^1 = d_{1j} \cdot \left(\frac{v_j}{v_1}\right)^{n/2}, \quad L_j^2 = \max_{k \neq j \neq 1} (d_{1j} \cdot \left(\frac{v_k}{v_1}\right)^n).$$

Інтервал стійкості $RSInt_{kj} = (\underline{d}_{kj}, \overline{d}_{kj})$ для оцінки d_{kj} , $k \neq j \neq 1$, такий що не змінюється найкраща альтернатива a_1 в R :

$$\underline{d}_{kj} = d_{kj} \cdot \left(\frac{v_j}{v_1}\right)^n, \quad \overline{d}_{kj} = d_{kj} \cdot \left(\frac{v_1}{v_k}\right)^n.$$

Теорема (про збереження ранжування альтернатив). За умов попередньої теореми інтервал стійкості $RSInt_{kj} = (\underline{d}_{kj}, \overline{d}_{kj})$ для оцінки d_{kj} , $k < j$, такий що ранжування R залишається незмінним, дорівнює:

$$\underline{d}_{kj} = d_{kj} \cdot \left(\frac{v_j}{v_k}\right)^{n/2}, \text{ якщо } k+1=j$$

$$\underline{d}_{kj} = \max(L_{kj}^1, L_{kj}^2), \text{ якщо } k+1 \neq j, \text{ де } L_{kj}^1 = d_{kj} \cdot \left(\frac{v_{k+1}}{v_k}\right)^n, L_{kj}^2 = d_{kj} \cdot \left(\frac{v_j}{v_{j-1}}\right)^n$$

$$\overline{d}_{kj} = \min(U_{kj}^1, U_{kj}^2), \text{ де } U_{kj}^1 = d_{kj} \cdot \left(\frac{v_j}{v_{j+1}}\right)^n, \text{ якщо } j < n, U_{kj}^2 = d_{kj} \cdot \left(\frac{v_{k-1}}{v_k}\right)^n.$$

Метод розрахунку індексів стійкості для збереження найкращої альтернативи в локальному ранжуванні альтернатив складається з етапів:

1. Знайти інтервали стійкості $RSInt_{1j} = (\underline{d}_{1j}, \overline{d}_{1j}]$, $j \neq 1$ та $RSInt_{kj} = (\underline{d}_{kj}, \overline{d}_{kj})$, $k \neq j \neq 1$ за теоремою про збереження найкращої альтернативи.
2. Знайти інтервали стійкості $CSInt_{ij} = (\underline{\delta}_{ij}, \overline{\delta}_{ij})$, $\forall i, j$, які зберігають узгодженість МПП: $\underline{\delta}_{ij} = \exp(n \cdot \ln(\rho_{\min}))$, $\overline{\delta}_{ij} = \exp(n \cdot \ln(\rho_{\max}))$, де $\ln \rho_{\min}$, $\ln \rho_{\max}$ – корені рівняння $\frac{2n}{(n-1)(n-2)} \cdot [(n-2) \cdot (\ln \rho_{ij})^2 + 2 \cdot \ln e_{ij} \cdot \ln \rho_{ij}] - \Delta = 0$, $\Delta > 0$.
3. Розрахувати інтервали стійкості $SInt_{ij} = RSInt_{ij} \cap CSInt_{ij} \quad \forall i, j$.
4. Шукані індекси стійкості $\delta_{ij} = \min((SInt_{ij})^{-1}, \overline{SInt_{ij}}) \quad \forall i, j$.

Метод розрахунку індексів стійкості для збереження всього локального ранжування альтернатив аналогічний описаному вище за виключенням першого етапу, на якому розраховуються інтервали стійкості $RSInt_{ij} = (\underline{d}_{ij}, \overline{d}_{ij})$, $i < j$ за теоремою про збереження ранжування альтернатив.

Удосконалено метод комплексного оцінювання чутливості шляхом додавання етапів оцінювання стійкості локального ранжування до змін в експертних оцінках парних порівнянь та оцінювання стійкості узгодженості множини експертних оцінок парних порівнянь до зміни окремих оцінок. Запровадження цих додаткових етапів дозволяє знайти окремі експертні оцінки парних порівнянь, які найбільшою мірою впливають на зміну локального ранжування альтернатив рішень та зміну рівня узгодженості множини оцінок. Аналізується також стійкість і чутливість глобального ранжування альтернатив рішень до зміни ваг критеріїв та локальних ваг альтернатив за критеріями. Шукаються стійкі експертні оцінки парних порівнянь та оцінки, які потребують перегляду для підвищення достовірності розв'язків, отриманих на основі ієрархічної моделі.

Розділ 4 присвячено методам розрахунку агрегованих ваг елементів ієрархічної та мережевої моделей. *Удосконалено гібридний метод розрахунку агрегованих ваг елементів ієрархічної моделі ППР із взаємозалежними критеріями рішень*, коли вхідними даними для оцінювання елементів моделі є чіткі і нечіткі експертні оцінки парних порівнянь. Удосконалення полягає у використанні розроблених більш ефективних методів оцінювання і підвищення узгодженості оцінок експерта.

Цей гібридний метод включає методи теорії прийняття рішень, нечітких множин, математичного програмування і статистики, які адаптуються на різних етапах багатокритеріального прийняття рішень (БКПР) залежно від задачі та якості вхідної експертної інформації. Множина критеріїв $C = \{c_j \mid j = 1, 2, \dots, m\}$ розбивається в цьому методі на незалежні підмножини (далі – фактори): $C = \bigcup_{l=1}^k f_l$ $f_l = \{c_{l1}, c_{l2}, \dots, c_{lp}\}$, $p \leq k \leq m$, таким чином, що в межах фактору f_l критерії $c_{l1}, c_{l2}, \dots, c_{lp}$ взаємозалежні, а самі фактори між собою є незалежними. Це розбиття дозволяє знизити розмірність простору критеріїв для коректного експертного оцінювання і знизити навантаження на експертів, так як кількість порівнюваних за один тур експертом елементів не повинна перевищувати число 7 ± 2 . Також стає можливим застосовувати більш простий, в порівнянні з відомим методом аналізу мереж, метод агрегування за взаємозалежними критеріями. Для задач з відносно невеликим числом альтернатив рішень розбиття множини критеріїв рішень на незалежні підмножини можна виконати вручну. У задачах з великою кількістю альтернатив для формування незалежних підмножин критеріїв доцільно використати відомі методи зниження розмірності, наприклад, факторного аналізу. До таких можуть бути віднесені задачі експертизи науково-дослідних, інвестиційних та інших проектів з метою вибору для фінансування одного або декількох з них, коли кількість проектів або альтернатив рішень, така, що можна говорити про обгрунтоване застосування статистичних підходів.

На наступному етапі експерт здійснює оцінювання альтернатив за критеріями в межах кожного фактору за методом парних порівнянь. Особливість гібридного методу полягає у застосуванні розроблених методів оцінювання і підвищення узгодженості чітких і нечітких оцінок експерта (див. розділи 2 і 3). На наступному етапі розраховуються локальні ваги альтернатив за кожним критерієм, використовуючи методи, запропоновані в розділі 3.

Після цього виконується агрегування знайдених локальних ваг альтернатив за критеріями в межах кожного фактору. Враховуючи, що ці критерії за умовою взаємозалежні, замість вектору $w = \{w_j \mid \sum_{j=1}^p w_j, w_j > 0\}$ ваг критеріїв розглядається нечітка міра g_λ , яка задає ваги всіх можливих підмножин множини критеріїв в межах фактору. Відомо, що аксіоматичне визначення нечіткої міри базується на більш слабкій вимозі монотонності, з метою розширення її можливостей для моделювання реальних процесів. Нечіткі міри імовірності ($\lambda = 0$), можливості ($\lambda = -1$) та необхідності ($\lambda > 0$) використовуються в методі для формалізації таких очікувань експерта як реалізм, оптимізм і песимізм. Тому використання нечіткої міри представляє єдиний підхід до представлення неточних, невизначених, неповних, нечітких значень критеріїв рішень.

Локальні ваги альтернатив за множиною взаємозалежних критеріїв кожного фактору агрегуються в гібридному методі з використанням нечітких інтегралів Шоке і Сугено, які є узагальненням відомих методів агрегування. В результаті отримаємо глобальні ваги альтернатив в межах факторів f_i . На останньому етапі знайдені ваги агрегуються з урахуванням ваг незалежних між собою факторів f_i . Для цього у багатьох відомих методах БКПР, таких як MAI, ELECTRE, PROMETHEE та інших, використовується правило лінійної згортки, яке призводить до явища реверсу рангів, небажаного для деяких практичних задач. Результати досліджень показали, що реверс рангів не виникає при використанні лінійної згортки з нормуванням до максимуму, а також мультиплікативної згортки, окрім деяких окремих випадків, коли такий реверс виправданий на практиці. У задачах БКПР, в яких реверс рангів є допустимим, на останньому етапі гібридного методу застосовується лінійна згортка. У задачах БКПР з фіксованою кількістю ресурсів, де реверс рангів виникати не повинен, на останньому етапі гібридного методу пропонується модифікований метод TOPSIS.

Запропоновано *спосіб оцінювання явища реверсу рангів*, яке може мати місце після застосування правил комбінування функцій довіри до елементів задачі ППР. В ньому визначено дві умови реверсу. У першій умові розглядаються зміни ранжувань на основі значень функцій агрегованої повної довіри до груп альтернатив. У другій умові досліджується зміна ранжування між групами альтернатив, спричинена зміною їх довірчих інтервалів. Досліджено різні види реверсу рангів в правилах комбінування Демпстера, Ягера, Жанга, Дюбуа і Прада, правилах дисконтованого та зваженого середнього значення при різних змінах множини альтернатив. Зокрема, отримано результати появи реверсу при додаванні або вилученні неоптимальної альтернативи, яка домінується однією або декількома «старими» альтернативами. Результати свідчать про те, що реверс рангів може мати місце при використанні правил комбінування Демпстера, Жанга та зваженого середнього значення в тому випадку, коли до розгляду додається неоптимальна альтернатива, яка формує окрему групу за кожним з критеріїв рішень, та коли вказані правила комбінування використовуються для вирішення задач прийняття рішень з конфліктними оцінками альтернатив за критеріями. Тоді така зміна ранжирування відображає раціональний процес прийняття рішення і не є недоліком вказаних правил комбінування.

Запропоновано удосконалення методу BOCR MAI, особливості якого полягають в тому, що на етапах оцінювання і підвищення узгодженості МПП і НМПП, а також розрахунку нечітких локальних ваг і комплексного оцінювання чутливості розв'язку використовуються розроблені в розділах 2 і 3 методи.

Розділ 5 присвячено розробці *методик, засобів і системи моделювання процесу оцінювання альтернатив рішень* експертом високої компетентності методами парних порівнянь в шкалі Сааті. Використовуючи цей інструментарій, отримано оцінки помилок ваг, обчислених методами типу «трикутник» і «лінія» парних порівнянь. У методах типу «лінія» ваги n альтернатив обчислюються на основі $n-1$ експертної оцінки парних порівнянь, виконаних у шкалі, і передбачається повна узгодженість знань експерта. Методи типу «трикутник» для обчислення ваг потребують надлишкову кількість $n(n-1)/2$ експертних оцінок, які використовуються

для оцінювання узгодженості знань експерта. Проведено порівняння результатів, отриманих цими двома групами методів. Показано, що умова повної узгодженості експертних оцінок парних порівнянь, виконаних у шкалі, може внести додаткову помилку при побудові МПП і, як наслідок, у результуючі ваги.

Використовуючи розроблену систему моделювання, оцінено ефективність пропонуваніх у розділі 2 і відомих методів аналізу узгодженості МПП на основі показників CR (Сааті), GCI (Морено-Зіменез), HCR , k_y (Тоценко) і CI^w (Ламата). Моделювання тестових МПП проведено в широкому діапазоні зміни їх рівня неузгодженості. Отримано, що показники HCR , k_y і CR часто призводять до різних висновків щодо допустимої неузгодженості МПП. Встановлено, що допустимість неузгодженості МПП на основі показників CR , GCI та CI^w і методу Сааті не гарантує, що ранжування альтернатив, отримані методами ЕМ і RGMM, будуть співпадати між собою. Тому ранжування альтернатив в багатьох випадках залишається невизначеним. Це в основному стосується слабо неузгоджених МПП. Суттєве обмеження відомих методів Сааті і Тоценко полягає в тому, що вони не ідентифікують порушення порядкової транзитивності або цикл в МПП. Присутність циклу в МПП означає, що не існує ранжування альтернатив, яке задовольняє всім елементам МПП. Проте, для ряду тестових задач було отримано, що метод Сааті визнає МПП з циклом допустимо неузгодженими і придатними для надійного розрахунку локальних ваг на їх основі.

В абсолютній більшості тестових задач і для всіх досліджуваних рівнів неузгодженості МПП пропонуваніх в розділі 2 метод оцінювання узгодженості більш ефективний в порівнянні з відовими методами Сааті і Тоценко, оскільки на етапах пропонуваного методу перевіряється наявність циклу в МПП і необхідність у коригуванні МПП. Ранжування альтернатив, отримані різними методами на основі МПП, неузгодженість яких оцінена і скоригована пропонуваніх в розділі 2 методом, в абсолютній більшості тестових задач співпадали між собою. Це підтверджує достовірність ранжувань, отриманих на основі скоригованих МПП.

Запропоновано *методику та засоби аналізу ефективності методів підвищення узгодженості МПП* розмірності $n > 3$, яка базується на *результатах моделювання*. Використовуючи пропонувану методику та засоби, виконано оцінювання ефективності відомих і запропонованих методів пошуку найбільш неузгодженого елемента та підвищення узгодженості МПП, яке складається з етапів:

1. Генерування тестових множин МПП D^* в шкалі Сааті з властивостями слабої узгодженості і допустимої неузгодженості за показником CR .
2. Побудова збурених МПП D^{dstrb} з більшим рівнем неузгодженості. Кожна МПП D^{dstrb} має цикл, є слабо неузгодженою. Елемент $d_{i\tilde{j}}$ – найбільш неузгоджений (ННЕ) в D^{dstrb} за побудовою.
3. Пошук ННЕ $d_{i^*j^*}$ в D^{dstrb} , використовуючи один з методів.
4. Коригування МПП D^{dstrb} шляхом зміни лише елемента $d_{i^*j^*}$, знайденого на попередньому кроці, та елемента $d_{j^*i^*}$.
5. Оцінювання ефективності методу, який використовувався на етапі 3 для пошуку ННЕ.

Означення. Метод називається ефективним, якщо вектор ваг w^{cor} на основі скоригованої МПП D^{dstrb} є ближчим до вектору ваг w^* ніж вектор ваг w^{dstrb} на основі початкової МПП D^{dstrb} до коригування:

$$dist(w^{cor}, w^*) < dist(w^{dstrb}, w^*),$$

де w^* – вектор ваг, близький до вектору реальних ваг, генерується на етапі ініціалізації, $dist$ – функція відстані. Наприклад, функція кутової відстані може використовуватися для аналізу МПП:

$$dist(x, y) = \left\| \frac{x}{\|x\|_2} - \frac{y}{\|y\|_2} \right\|_2.$$

Теорема. Ефективний метод призводить до більш узгоджених МПП за умов моделювання.

Теорема. Нехай $D = \{d_{ij} \mid i, j = 1, \dots, n\}$ – мультиплікативна МПП в шкалі Сааті з властивостями слабкої узгодженості і допустимої неузгодженості, (\tilde{i}, \tilde{j}) – пара індексів, $\tilde{i}, \tilde{j} = 1, \dots, n$, $\tilde{i} < \tilde{j}$ та $d_{\tilde{i}\tilde{j}} \geq 1$. Нехай МПП D' – збурення D , таке що всі елементи D' співпадають з відповідними елементами D , крім $d'_{\tilde{i}\tilde{j}}$, який дорівнює $d'_{\tilde{i}\tilde{j}} = 1/d_{\tilde{i}\tilde{j}}$, та $d'_{\tilde{j}\tilde{i}} = d_{\tilde{i}\tilde{j}}$. Тоді максимальне покращення узгодженості МПП D' за показником CR за один крок є результатом зміни елементів $d'_{\tilde{i}\tilde{j}}$ і $d'_{\tilde{j}\tilde{i}}$.

Оцінки ефективності методів пошуку найбільш неузгоджених елементів МПП свідчать про те, що *пропоновані в розділі 2 методи Transitiv і MOutflow приводять до більш ефективних результатів* в порівнянні з іншими відомими методами CI, Corr (Ліповецький і Конклін, 2003) і Outflow (Сірай, 2012) (табл.3 і 4).

Таблиця 3. Відсотки вірного пошуку найбільш неузгодженого елементу МПП (перша технологія генерування МПП)

n	4	5	6
Метод CI	94	94	90
Метод Corr	56	70	73
Метод Outflow	87	91	89
Метод Transitiv	94	95	93
Метод MOutflow	98	95	94

Таблиця 4. Відсотки вірного пошуку найбільш неузгодженого елементу МПП (друга технологія генерування МПП)

n	4	5	6	7	8
Метод CI	91	90	90	89	88
Метод Corr	43	51	54	53	53
Метод Outflow	58	72	81	86	89
Метод Transitiv	91	92	93	93	94
Метод MOutflow	95	95	97	98	98

Метод *MOutflow* правильно знайшов найбільш неузгоджені елементи більш ніж в 95% експериментів за умов моделювання і в усіх експериментах виключалися цикли у згенерованих тестових множинах МПП. Більш ніж з 95% імовірністю

можна стверджувати, що вектори ваг на основі МПП, скоригованих з використанням методу MOutflow, є ближчими до векторів реальних ваг у порівнянні з векторами ваг на основі початкових МПП до коригування.

Побудована система моделювання використана для аналізу методів підвищення узгодженості МПП без участі експерта. В процесі моделювання генерувалися тестові множини допустимо неузгоджених за показником CR МПП D^* в шкалі Сааті. Надалі ці МПП збурювалися так що їх неузгодженість збільшувалася і подавалися на вхід алгоритмів коригування. Нехай $D^{disturb}(l)$ – збурена МПП, l – номер експерименту. МПП $D^{disturb}(l)$ коригувалася, використовуючи два наведені в розділі 2 алгоритми підвищення узгодженості без участі експерта. Досліджувалося, наскільки вектор ваг $w^{cor j}(l)$, отриманий на основі МПП скоригованої j -м алгоритмом, знаходиться ближче до відомого в процесі моделювання вектору $w^*(l)$ реальних ваг, ніж вектор ваг $w^{disturb}(l)$ на основі МПП до коригування.

Отримані в результаті ряди $\{dist(l)\}$, $dist(l) = dist(w^{disturb}(l), w^*(l))$ і $\{dist^{cor j}(l)\}$, $dist^{cor j}(l) = dist(w^{cor j}(l), w^*(l))$ мали, в основному, розподіл близький до нормального. Для цих рядів обчислено основні статистичні характеристики – вибіркове середнє і стандартне відхилення (табл. 5 – 7). Так як значення відстаней $dist(l)$ і $dist^{cor j}(l)$ характеризують помилки обчислення ваг $w^{disturb}(l)$ і $w^{cor j}(l)$, відповідно, то j -й алгоритм коригування є, в середньому, більш ефективним, якщо вибіркове середнє і стандартне відхилення для ряду $\{dist^{cor j}(l)\}$ приймають менші значення.

Моделювання показало, що ефективність пропонованих алгоритмів підвищення узгодженості МПП залежить від відсотка помилкових елементів МПП, які є значними збуреннями реальних значень. Цей відсоток можна оцінити, використовуючи розроблений в розділі 2 метод Transitive. Досліджувані алгоритми підвищення узгодженості ефективні для МПП, у яких значного збурення зазнали окремі елементи. Причому, для таких МПП другий алгоритм на порядок ефективніший, ніж перший (табл.7). Якщо усі елементи скоригованої МПП значно збурені, внаслідок чого ця МПП є недопустимо неузгодженою, то забезпечення допустимої неузгодженості МПП в результаті її коригування досліджуваними алгоритмами без участі експерта не забезпечує близькість до реальних ваг.

Таблиця 5. Значення вибіркової середньої і стандартного відхилення для рядів $\{dist(l)\}$ і $\{dist^{cor j}(l)\}$, МПП $D^{disturb}$ слабо узгоджена зі значеннями CR в інтервалі $(CR^{porog}, 1.5 \cdot CR^{porog})$

n		4	5	6
До коригування	$(m; \sigma)$	(0.347; 0.084)	(0.342; 0.068)	(0.338; 0.058)
Алгоритм коригування 1	$(m^{mult}; \sigma^{mult})$	(0.346; 0.084)	(0.342; 0.066)	(0.340; 0.057)
	$(m^{ad}; \sigma^{ad})$	(0.346; 0.084)	(0.343; 0.066)	(0.341; 0.057)
Алгоритм коригування 2	$(m^{Cl}; \sigma^{Cl})$	(0.361; 0.104)	(0.367; 0.075)	(0.362; 0.060)
	$(m^{Tr}; \sigma^{Tr})$	(0.361; 0.104)	(0.343; 0.074)	(0.341; 0.060)
	$(m^{Oflow}; \sigma^{Oflow})$	(0.352; 0.099)	(0.357; 0.074)	(0.354; 0.063)

Таблиця 6. Значення вибіркової середньої і стандартного відхилення для рядів $\{dist(l)\}$ і $\{dist^{cor\ j}(l)\}$, МПП $D^{disturb}$ слабо узгоджена зі значеннями CR в інтервалі $(3.5 \cdot CR^{porog}, 5.5 \cdot CR^{porog})$

	n	4	5	6
До коригування	$(m; \sigma)$	(0.229; 0.092)	(0.381; 0.088)	(0.388; 0.076)
Алгоритм коригування 1	$(m^{mult}; \sigma^{mult})$	(0.235; 0.089)	(0.393; 0.082)	(0.402; 0.071)
	$(m^{ad}; \sigma^{ad})$	(0.235; 0.092)	(0.398; 0.084)	(0.408; 0.071)
Алгоритм коригування 2	$(m^{Cl}; \sigma^{Cl})$	(0.361; 0.098)	(0.467; 0.085)	(0.469; 0.073)
	$(m^{Corr}; \sigma^{Corr})$	(0.313; 0.108)	(0.444; 0.099)	(0.436; 0.087)
	$(m^{Tr}; \sigma^{Tr})$	(0.361; 0.098)	(0.468; 0.083)	(0.474; 0.072)
	$(m^{Oflow}; \sigma^{Oflow})$	(0.400; 0.099)	(0.497; 0.091)	(0.480; 0.077)

Таблиця 7. Значення вибіркової середньої і стандартного відхилення для рядів $\{dist(l)\}$ і $\{dist^{cor\ j}(l)\}$, МПП $D^{disturb}$ слабо неузгоджена з одним викидом

	n	4	5	6
До коригування	$(m; \sigma)$	(0.551; 0.155)	(0.420; 0.156)	(0.335; 0.145)
Алгоритм коригування 1	$(m^{mult}; \sigma^{mult})$	(0.512; 0.142)	(0.367; 0.135)	(0.280; 0.119)
	$(m^{ad}; \sigma^{ad})$	(0.519; 0.176)	(0.381; 0.171)	(0.297; 0.152)
Алгоритм коригування 2	$(m^{Cl}; \sigma^{Cl})$	(0.035; 0.045)	(0.034; 0.045)	(0.027; 0.042)
	$(m^{Corr}; \sigma^{Corr})$	(0.251; 0.284)	(0.115; 0.182)	(0.067; 0.119)
	$(m^{Tr}; \sigma^{Tr})$	(0.035; 0.045)	(0.034; 0.047)	(0.025; 0.041)
	$(m^{Oflow}; \sigma^{Oflow})$	(0.035; 0.045)	(0.033; 0.046)	(0.025; 0.039)

Розроблено методику і засоби аналізу ефективності пропонованого в розділі 3 методу розрахунку довірчих інтервалів для локальних ваг, яка також базується на результатах моделювання. З їх використанням проведено порівняння результуючих інтервалів, отриманих розробленим методом, з нечіткими локальними вагами, отриманими відомими методами на основі фазифікованої МПП. Методика складається з наступних етапів:

1. Генеруються тестові множини МПП, які відповідають оцінкам експертів реаліста, оптиміста, песиміста – вхідним даним для методу розрахунку довірчих інтервалів.
2. Кожна МПП $D = \{d_{ij} \mid i, j = 1, \dots, n\}$ фазифікується з використанням нечіткої шкали Сааті з трикутними функціями приналежності $[l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}]$: $l_{ij} = d_{ij} - 1$, $m_{ij} = d_{ij}$, $u_{ij} = d_{ij} + 1$ для $d_{ij} > 1$, $d_{ij} < 9$; $l_{ij} = 1$, $m_{ij} = 1$, $u_{ij} = 2$ для $d_{ij} = 1$, $i \neq j$; $l_{ij} = 8$, $m_{ij} = 9$, $u_{ij} = 9$ для $d_{ij} = 9$; $l_{ii} = m_{ii} = u_{ii} = 1$; $l_{ij} = 1/u_{ji}$, $m_{ij} = 1/m_{ji}$, $u_{ij} = 1/l_{ji}$ для $d_{ij} < 1$.
3. На основі фазифікованих МПП обчислюються нечіткі вектори ваг $w = ([w_i^l, w_i^u] \mid i = 1, \dots, n)$ одним з відомих нечітких методів.
4. В кожному з експериментів обчислюється величина

$$b = \max_{i=1, \dots, n} (w_i^u - w_i^l),$$

яка характеризує невизначеність результатів за нечітким методом. Шукається вибіркове середнє \hat{b} за всіма експериментами.

- Для кожного n значення \hat{b} порівнюється із значенням \hat{m}_\ominus , яке характеризує невизначеність результатів за пропонованим методом розрахунку довірчих інтервалів (табл.8, 9).

Таблиця 8. Вибіркові середні \hat{b} і стандартні відхилення $\sigma(b)$ для величини b в методі нечіткої геометричної середньої для експерта-реаліста

n	3	4	5	6	7	8	9
\hat{b}	0.600	0.546	0.483	0.429	0.384	0.347	0.316
$\sigma(b)$	0.097	0.065	0.046	0.031	0.022	0.017	0.015

Таблиця 9. Вибіркові середні \hat{m}_\ominus у пропонованому методі

n	3	4	5	6	7	8	9
$\hat{m}_\ominus^{realist}$	0.114	0.116	0.116	0.113	0.107	0.101	0.095
$\hat{m}_\ominus^{pessimist}$	0.323	0.327	0.322	0.315	0.311	0.309	0.303

Порівнюючи значення \hat{b} і \hat{m}_\ominus (табл.8, 9), отримаємо, що для усіх n середня ширина довірчого інтервалу, отриманого пропонованим методом для оцінок експерта-песиміста/оптиміста є меншою за відповідну середню ширину результуючого вектору нечітких ваг за методом нечіткої геометричної середньої. Середня ширина довірчого інтервалу для оцінок експерта-реаліста є значно меншою за відповідну середню ширину результуючого вектору нечітких ваг за методом нечіткої геометричної середньої.

Таким чином, моделювання на великій кількості тестових МПП показало, що *результати застосування пропонованого методу розрахунку довірчих інтервалів є більш ефективними* порівняно з нечіткими вагами за методом FRGMM з трикутними функціями приналежності для оцінок як експерта-реаліста, так і експерта песиміста/оптиміста.

Проведено порівняльний аналіз сучасних моделей GPM, LUAM і TLGP, які обчислюють інтервальні ваги на основі мультиплікативних ІМПП. Модель GPM виявилася кращою за інші досліджувані моделі за характеристиками: отримання нормованих векторів інтервальних ваг, існування розв'язку незалежно від рівня узгодженості ІМПП, можливість оцінювання і підвищення узгодженості ІМПП, легкість розширення на більш широкий клас НМПП та зручність результатів для подальшого використання. Встановлено, що властивість слабого збереження порядку результуючих інтервальних ваг в основному дозволяє виявити цикл в слабко неузгодженій ІМПП. Після коригування елементів, які утворюють цикл, протиріччя у вагах виключаються, підвищується достовірність отриманих розв'язків.

Отримані результати аналізу використано в розділі 3 при розробці методу розрахунку нечітких локальних ваг на основі нечіткої матриці парних порівнянь.

У розділі 6 описано інструментарій підтримки прийняття рішень у вигляді СППР, побудований на основі запропонованих моделей, методів та підходів. Функціональні можливості цієї СППР включають:

- побудову і обробку мережевої моделі ППР,
- редагування моделі в зручному графічному інтерфейсі користувача,
- використання в якості вхідних даних експертних оцінок і статистики,
- використання експертних оцінок парних порівнянь у шкалі, а також безпосередньо у вигляді числових значень,
- введення даних як вручну, так і їх завантаження із зовнішніх джерел,
- використання шаблонів моделей, накопичених в системі,
- розрахунок ваг елементів моделі на основі чітких і нечітких оцінок експертів, а також неповної множини експертних оцінок,
- пошук найбільш неузгоджених, суперечливих оцінок експертів, циклів, їх коригування з метою підвищення узгодженості з участю і без участі експерта,
- обчислення локальних ваг елементів моделі різними методами для отримання більш достовірних результатів,
- врахування невизначеності експертних оцінок і невизначеності шкали, яка використовується для оцінювання,
- моделювання і врахування при розрахунках особистих якостей експерта, таких як песимізм і оптимізм,
- врахування факторів ризику при оцінюванні альтернатив рішень,
- обробка оцінок групи експертів з урахуванням їх компетентності,
- обчислення агрегованих ваг елементів моделі різними методами,
- аналіз чутливості результатів та визначення стійких елементів задачі.

Архітектура і функціональна схема СППР наведені на рис.5 і 6.

Підсистему аналізу і обробки даних і підсистему функціональних модулів реалізовано в середовищі Python 3. Підсистему інтерфейсу користувача СППР написано з використанням бібліотеки PyQt 5. Для описання компонент підсистеми функціональних модулів використано уніфіковану мову моделювання UML. Для збереження моделей в СППР розроблено власний формат даних .ahp на основі відомого текстового формату обміну даними JavaScript Object Notation (JSON).

Всі модулі, які виконують розрахунки, було протестовано на великій кількості тестових задач ППР. Результати їх роботи узгоджувалися з результатами, отриманими комерційною СППР SuperDecisions.

Переваги розробленої СППР над відомими СППР того ж класу включають: можливість працювати на операційних системах Windows, Mac або Linux без зміни жодного рядка коду (крос-платформеність), використання програмного забезпечення з відкритим кодом (open source), можливість збереження та завантаження моделі з усіма розрахунками, побудова, візуалізація та редагування моделі в зручному для користувача графічному режимі, а також реалізація великої кількості різних методів розрахунку локальних і глобальних ваг елементів моделі, засобів аналізу чутливості результатів. Розроблена СППР не є проблемно-орієнтовною і може використовуватися для розв'язання задачі ППР в будь-якій предметній області.

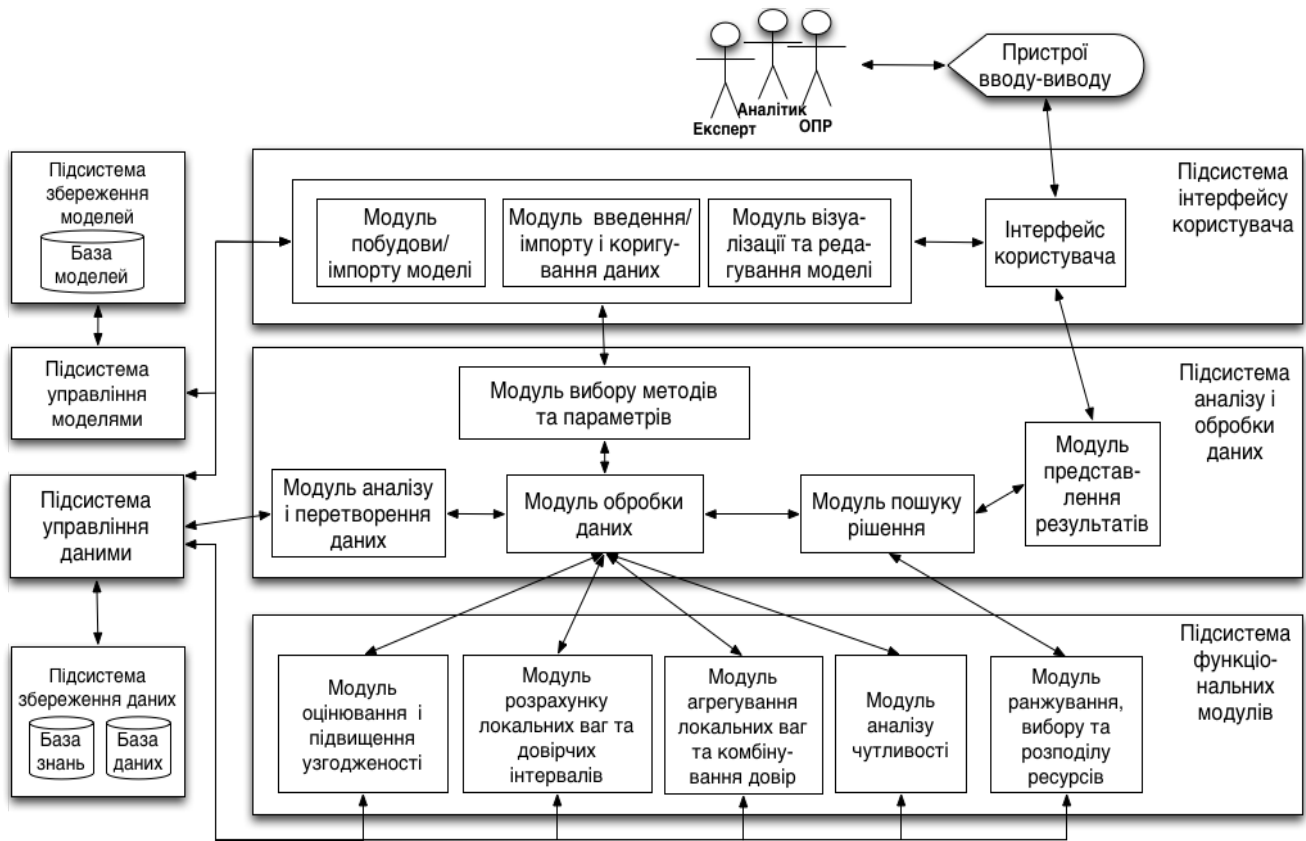


Рис.5. Загальна архітектура СППР



Рис. 6. Функціональна схема СППР

Розділ 7 присвячено застосуванню розробленої методології та інструментарію до розв'язання практичних задач ППР на замовлення міністерств і відомств України. В межах договірної тематики з Міністерством освіти і науки України проведено оцінювання критичних технологій енергетики України. Вхідними даними були: перелік критичних технологій енергетики України, згрупованих в три кластери – енергозберігаючі технології, відновлювальна енергетика та екобудинки; текстові описи та паспорти, що містили критерії оцінювання технологій, такі як економічна ефективність, конкурентоспроможність, технологічна складність, витрати, та кількісні та якісні оцінки технологій за цими критеріями. Дані надавалися підприємствами України – виробниками вказаних технологій. Група експертів з Інституту енергозбереження та енергоефективності НТУУ КПІ виконала оцінювання важливості критеріїв та надала оцінки технологій за критерієм "ризик". Ставилася задача знайти найбільш пріоритетний кластер, розрахувати агреговані пріоритети технологій та на їх основі визначити найбільш пріоритетні технології для впровадження. Задача розв'язувалася запропонованим інструментарієм і в результаті отримано, що найбільш пріоритетним кластером є екобудинки, а найбільш пріоритетні технології наступні: удосконалення та структурної оптимізації енергетичних мереж згідно намірів гармонізації з енергетичною системою країн Європейського Союзу (перше місце), технологія ефективного використання теплоти ґрунту і ґрунтових вод в комбінованих теплонасосних системах та технологія використання різнорідних відновлювальних джерел енергії в інтегрованих теплонасосних системах (друге місце), технологія парокомпресійних теплових насосів (третє місце).

Поставлена задача була розв'язана іншим методом експертного оцінювання – методом морфологічного аналізу. Порівняння результатів показало, що запропонована методологія та морфологічний аналіз однаково визначили найбільш пріоритетну і наступні дві менш пріоритетні технології. Ранжування технологій за обома методами виявилось близьким.

При виконанні НДР спільно з Інститутом космічних досліджень виконано оцінювання напрямків доцільного використання космічної інформації (КІ) дистанційного зондування землі (ДЗЗ) для геоінформаційних систем (ГІС). На вхід було подано ієрархічну модель задачі, яка містила наступні рівні: 1) перелік факторів, які впливають на використання КІ ДЗЗ в різних галузях господарської діяльності; 2) об'єми можливого використання КІ ДЗЗ; 3) перелік космічних апаратів, інформація з яких використовується; 4) інформаційні характеристики КІ, які визначаються параметрами космічних апаратів; 5) галузі народного господарства України, які мають попит на КІ ДЗЗ. Потрібно було визначити відносний попит на КІ ДЗЗ у вказаних галузях народного господарства. Застосування розробленого інструментарію показало, що найбільший попит на КІ ДЗЗ в Україні мають галузі сільського господарства, екології та надзвичайних ситуацій.

На замовлення Київської міської державної адміністрації (КМДА) здійснено оцінювання заходів вирішення соціальних проблем міста Києва на основі побудованих моделей доходів, витрат, можливостей та ризиків. Так, досліджувалися складові доходів і витрат від економічної діяльності, природного середовища, соціальної сфери та інновацій. Враховувалися такі складові ризиків і загроз як нестабільність економіки, виникнення надзвичайних ситуацій, політична

нестабільність та зростання соціальної напруги. Для розрахунку коефіцієнтів відносної важливості якостей «доходи», «витрати», «ризик та загрози» використано модель, яка включала економічні критерії зростання, стабільності та соціальної орієнтованості, політичні критерії оцінювання якості рішення, а також критерії регіональної та місцевої безпеки. Вхідними даними для оцінювання моделей були оцінки експертів та статистичні матеріали, надані КМДА. В результаті пріоритетними заходами для реалізації стали будівництво двох сміттєпереробних заводів в Деснянському і Голосіївському районах міста, реконструкція Бортницької станції аерації та будівництво другої нитки Головного каналізаційного колектору. В межах цієї задачі було побудовано модель і на її основі з позицій сталого розвитку проведено оцінювання альтернатив розвитку транспортної системи міста Києва, покладаючи рівну важливість економічних, соціальних та екологічних факторів. В модель було включено кластер акторів, таких як бізнес, населення, КМДА та міжнародний союз громадського транспорту, та їх цілей. На основі розрахованих за моделлю агрегованих імовірностей сценаріїв отримано, що лише комплексна реконструкція сприяє компромісному задоволенню цілей акторів транспортної системи. На другому етапі побудовано модель для розв'язання зворотної задачі, мета якої – оцінити дії для досягнення бажаного сценарію – світового рівня розвитку транспортної системи міста Києва. Розрахунки показали, що найбільш пріоритетними діями КМДА мають бути наступні: обмеження проїзду вантажних автомобілів вулицями Києва, реконструкція Московської і Ленінградської площ, будівництво Кільцевої дороги, введення в експлуатацію автоматизованих постів спостереження за станом атмосферного повітря в місті.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена важлива науково-технічна проблема розробки методологічного і математичного забезпечення, яке з використанням системного підходу дозволяє підвищити достовірність розв'язків задач підтримки прийняття рішень в складних слабо структурованих системах на основі ієрархічних та мережевих моделей.

Результати досліджень використовуються в навчальному процесі кафедри математичних методів системного аналізу ІПСА КПІ ім. Ігоря Сікорського, зокрема при викладанні дисциплін «Прийняття рішень в ієрархічних системах», «Інтелектуальні системи прийняття рішень», «Системи підтримки прийняття рішень» та при виконанні магістерських робіт студентів спеціальностей 8.04030301 «Системний аналіз і управління» та 8.04030302 «Системи і методи прийняття рішень» (акт впровадження від 20.02.2018 р.)

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Проведено аналіз дослідження проблем розв'язання задач підтримки прийняття рішень в слабо структурованих системах з людським фактором на основі ієрархічних та мережевих моделей та методу парних порівнянь. За результатами цього аналізу зроблено висновок про доцільність розробки методологічного, математичного забезпечення та інструментарію ППР на основі ієрархічних та мережевих моделей. Показано, що методи аналізу ієрархій і мереж

використовуються для багатьох практичних задач підтримки прийняття рішень в різних предметних областях та займають важливе місце в методології сценарного аналізу розв'язання задач передбачення.

2. Запропоновано методологію підтримки прийняття рішень, яка з використанням системного підходу призводить до більш достовірних розв'язків задач ППР в складних слабо структурованих системах на основі ієрархічних та мережевих моделей.

3. Розроблено засоби оцінювання і підвищення достовірності розв'язків практичних задач ППР, отриманих на основі ієрархічних та мережевих моделей, які включають підвищення достовірності вхідних експертних оцінок за показниками узгодженості, оцінювання стійкості отриманих ранжувань елементів моделі та розрахунок нечітких ваг та довірчих інтервалів для ваг, на відміну від точкових ваг, розрахованих відомими методами. Підвищення достовірності вхідних експертних оцінок при розв'язанні практичної задачі ППР має місце за рахунок використання запропонованого в роботі більш ефективного методу оцінювання і підвищення узгодженості цих оцінок. Ефективність методу перевіряється шляхом моделювання множин тестових задач ППР і оцінюється значенням віддаленості вектору розрахованих ваг від вектору реальних ваг, який генерується в процесі моделювання. Стійкість розв'язку оцінюється запропонованими індексами стійкості та чутливості.

4. Розроблено метод оцінювання і підвищення узгодженості матриць парних порівнянь, який відрізняється від інших врахуванням властивості слабкої узгодженості МПП, пошуком найбільш неузгодженого елементу МПП та використанням для МПП загального виду. Метод дає більш достовірні результати ніж відомі методи в тому розумінні, що на тестових задачах ППР вектор ваг на основі МПП з підвищеною узгодженістю є ближчим до вектору відомих в процесі моделювання реальних ваг ніж вектор ваг на основі початкової МПП до коригування. Для пошуку найбільш неузгоджених елементів МПП удосконалено метод потоків та запропоновано метод Transitiv. Розроблено спосіб підвищення узгодженості МПП без участі експерта на основі відомих мультиплікативного та адитивного методів, який відрізняється від інших отриманими властивостями цих методів.

5. Запропоновано метод розрахунку довірчих інтервалів для локальних ваг елементів ієрархічної моделі, який, на відміну від інших, враховує невизначеність шкали, особистих якостей експерта, таких як оптимізм, песимізм та не потребує порівняння груп елементів з фреймом. Введено показник невизначеності експертних оцінок парних порівнянь, який, на відміну від інших, враховує невизначеність вказаних видів. Пропоновані довірчі інтервали більш достовірно відображають реальні ваги, невідомі в практичній задачі ППР, порівняно з точковими вагами, які розраховано традиційними методами, та нечіткими вагами за методом нечіткої геометричної середньої. Запропоновано базову модель для оцінювання якостей експерта при розв'язанні практичної задачі ППР.

6. Удосконалено метод розрахунку нечітких локальних ваг елементів мережевої моделі на основі нечітких МПП, який відрізняється від інших методом оцінювання і підвищення узгодженості нечітких МПП, врахуванням властивостей сильного і слабого збереження порядку на множині нечітких ваг.

7. Удосконалено гібридний метод розрахунку локальних та агрегованих ваг для елементів ієрархічної моделі із взаємозалежними критеріями, який відрізняється від інших методом оцінювання і підвищення узгодженості нечітких експертних оцінок.

8. Удосконалено метод комплексного оцінювання чутливості шляхом додавання етапів оцінювання стійкості локального ранжування до змін в експертних оцінках парних порівнянь та оцінювання стійкості узгодженості множини експертних оцінок парних порівнянь до зміни окремих оцінок. Запровадження цих додаткових етапів дозволяє знайти окремі експертні оцінки парних порівнянь, які найбільшою мірою впливають на зміну локального ранжування альтернатив рішень та зміну рівня узгодженості множини оцінок. Шукаються стійкі експертні оцінки парних порівнянь та оцінки, які потребують перегляду для підвищення достовірності розв'язків. Аналізується також стійкість і чутливість глобального ранжування альтернатив рішень на основі ієрархічної моделі до зміни ваг критеріїв та локальних ваг альтернатив за критеріями.

9. Запропоновано спосіб оцінювання появи реверсу рангів при використанні різних правил комбінування функцій довіри до елементів ієрархічної моделі.

10. Розроблено методики аналізу ефективності методів, засоби та систему моделювання експертного оцінювання.

11. Створено інструментарій підтримки прийняття рішень у вигляді СППР на основі запропонованих моделей, методів та підходів. Розроблена СППР не є проблемно-орієнтовною і може використовуватися для розв'язання задачі ППР в будь-якій предметній області.

12. Застосовано розроблену методологію та інструментарій до розв'язання ряду практичних задач підтримки прийняття рішень на замовлення міністерств і відомств України. В межах договірної тематики з Міністерством освіти і науки України з використанням розробленої методології та інструментарію проведено оцінювання критичних технологій енергетики України. При виконанні НДР спільно з Інститутом космічних досліджень виконано оцінювання напрямків доцільного використання космічної інформації дистанційного зондування землі для геоінформаційних систем. На замовлення Київської міської державної адміністрації здійснено оцінювання заходів вирішення соціальних проблем міста Києва з точки зору доходів, витрат, можливостей та ризиків з метою вибору пріоритетних заходів для реалізації. Проведено оцінювання сценаріїв розвитку транспортної системи міста Києва.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Недашківська Н.І. Системний підхід до підтримання прийняття рішень на основі ієрархічних та мережевих моделей. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2018. №1. С.7 – 18, що входить до наукометричних баз DOAJ, Index Copernicus, Google Scholar, РИНЦ та ін.
2. Nedashkovskaya N.I. Investigation of methods for improving consistency of a pairwise comparison matrix. *Journal of the Operational Research Society*. Опубліковано online: 02 лютого 2018. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01605682.2017.1415640>, що входить до наукометричних баз SCOPUS,

- INSPEC, ABI/INFORM, CSA High Technology Research Database with Aerosp., CSA Materials Research Database with METADEX, Science Citation Index та ін.
3. Nedashkovskaya N.I. Evaluation of quality of expert pairwise comparison judgements in decision-making techniques. *International Journal of Latest Engineering and Management Research*. 2018. Vol.3, No.5. P. 69 – 74, що входить до наукометричних баз Open J-Gate, Index Copernicus, Google Scholar та ін.
 4. Недашківська Н.І. Оцінювання стійкості локальних ваг альтернатив рішень на основі методу парних порівнянь. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2016. №4. С.14 – 22, що входить до наукометричних баз DOAJ, Index Copernicus, Google Scholar, ПИНЦ та ін.
 5. Pankratova N.D., Nedashkovskaya N.I. Sensitivity analysis of a decision-making problem using the Analytic Hierarchy Process. *International Journal «Information Theories and Applications»*. 2016. Vol.23, No.3. P.232 – 251, що входить до наукометричних баз Worldcat, ROAD Directory of Open Access scholarly Resources, Google Scholar, CiteseerX and ITHEA.
 6. Pankratova N.D., Nedashkovskaya N.I. Estimation of decision alternatives on the basis of interval pairwise comparison matrices. *Intelligent Control and Automation Journal*. 2016. Vol.7, No. 2. P. 39 – 54, що входить до наукометричних баз Worldcat, CiteseerX, Academic Journals Database, CrossRef, i-Scolar, NSTL, Yale University Library та ін.
 7. Pankratova N.D., Nedashkovskaya N.I. Estimation of Consistency of Fuzzy Pairwise Comparison Matrices using a Defuzzification Method. V.A. Sadovnichiy and M.Z. Zgurovsky (eds.), *Advances in Dynamical Systems and Control, Studies in Systems, Decision and Control*. 2016. Vol. 69, P.375-386. DOI 10.1007/978-3-319-40673-2_20, що входить до наукометричної бази **SCOPUS**.
 8. Pankratova N.D., Nedashkovskaya N.I. Methods of evaluation and improvement of consistency of expert pairwise comparison judgements. *International Journal «Information Theories and Applications»*. 2015. Vol.22, No.3. P.203-223, що входить до наукометричних баз Worldcat, ROAD Directory of Open Access scholarly Resources, Google Scholar, CiteseerX and ITHEA.
 9. Nedashkovskaya N.I. Method for Evaluation of the Uncertainty of the Paired Comparisons Expert Judgements when Calculating the Decision Alternatives Weights. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2015. Vol. 47, No. 10. P.69 – 82, що входить до наукометричних баз ISI Thompson Science Citation Index, **SCOPUS**, CAS, PubMed, CrossRef, та ін.
 10. Недашківська Н.І. Построение доверительных интервалов для весов альтернатив решений на основе экспертных оценок парных сравнений. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2015. №3. С. 121 – 130, що входить до наукометричних баз DOAJ, Index Copernicus, Google Scholar, ін.
 11. Недашківська Н.І. Принятие решений при согласованных экспертных оценках парных сравнений. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2014. №4. С. 35 – 44, що входить до наукометричних баз DOAJ, Index Copernicus, Google Scholar, ПИНЦ та ін.
 12. Pankratova N. D., Nedashkovskaya N.I. Hybrid Method of Multicriteria Evaluation of Decision Alternatives. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2014. Vol. 50, No. 5. P. 701-711, що входить до наукометричних баз **SCOPUS**, INSPEC, Zentralblatt Math, Google Scholar та ін.

13. Недашківська Н.І. Метод узгоджених парних порівнянь при оцінюванні альтернатив рішень за якісним критерієм. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2013. №4. С. 67 – 79, що входить до наукометричних баз DOAJ, Index Copernicus, Google Scholar, РИНЦ та ін.
14. Pankratova N.D., Nedashkovskaya N.I. The Method of Estimating the Consistency of Paired Comparisons. *International Journal «Information Technologies and Knowledge»*, Vol.7, No.4. 2013. P. 347 – 361, що входить до наукометричних баз Worldcat, ROAD Directory of Open Access scholarly Resources, Google Scholar, CiteseerX and ITHEA.
15. Pankratova N.D., Nedashkovskaya N.I. Spectral coefficient of consistency of fuzzy expert information and estimation of its sensitivity to fuzzy scales when solving foresight problems. *International Journal «Information Technologies and Knowledge»*. 2012. Vol.6, No. 4. P. 316 – 329, що входить до наукометричних баз Worldcat, ROAD Directory of Open Access scholarly Resources, Google Scholar, CiteseerX and ITHEA.
16. Pankratova N.D., Nedashkovskaya N.I. Estimation of Sensitivity of the DS/AHP Method While Solving Foresight Problems with Incomplete Data. *Intelligent Control and Automation Journal*. 2013. Vol. 4, No. 1. P.80 – 86, що входить до наукометричних баз Worldcat, CiteseerX, Academic Journals Database, CrossRef, i-Solar, NSTL, Yale University Library та ін.
17. Недашковская Н.И. Оценивание чувствительности метода ДШ/МАИ к изменениям во множестве альтернатив. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2012. №1. С. 17 – 30, що входить до наукометричних баз DOAJ, Index Copernicus, Google Scholar, РИНЦ та ін.
18. Недашковская Н.И. Принятие решений по многим критериям при неполных экспертных оценках на базе метода анализа иерархий и теории Демпстера-Шафера. *Наукові праці. Чорноморський державний університет імені Петра Могили. Серія «Комп'ютерні технології»*. 2010. Вип.130, Том.143. С. 6 – 11, що входить до наукометричних баз Index Copernicus, Google Scholar.
19. Недашковская Н.И. Метод анализа иерархий в методологии сценарного анализа решения задач предвидения. *Східно-європейський журнал передових технологій*. 2010. Том 4, №9 (46). С.35 – 42, що входить до наукометричних баз DOAJ, Index Copernicus, Google Scholar та ін.
20. Недашковская Н.И. Многокритериальное принятие решений с использованием максиминного синтеза в методе анализа иерархий (МАИ). *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2010. №3. С.7 – 16, що входить до наукометричних баз DOAJ, Index Copernicus, Google Scholar, РИНЦ та ін.
21. Pankratova N.D., Nedashkovskaya N.I. Evaluating multifactor risks under conceptual uncertainty. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2009. Vol.45, No. 2. P. 223 – 231, що входить до наукометричних баз **SCOPUS**, INSPEC, Zentralblatt Math, Google Scholar та ін.
22. Pankratova N.D., Nedashkovskaya N.I. A Decision Support System for Evaluation of Decision Alternatives on Basis of a Network Criteria Model. *Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. IEEE. 2017. P. 830 – 835. DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100363, що входить до наукометричних баз **SCOPUS**, ISI.

23. Nedashkovskaya N.I. Multi-criteria decision making in the presence of ignorance using the DS/AHP Method ISAHp 2011: *The XI International Symposium for the AHP/ANP: Proceedings* (Naples, Italy 15-18 June, 2011). Naples, 2011. 9 pages. Режим доступу: <http://www.isahp.org/italy2011/proceedings-from-past-meetings>.
24. Недашківська Н.І. Порівняльний аналіз методів розрахунку пріоритетів альтернатив рішень на основі нечітких експертних оцінок парних порівнянь. *International conference on System Analysis and Information Technology*: матеріали 19-ї міжнародної науково-технічної конференції SAIT-2017 (Київ, 22 – 25 трав. 2017 р). Київ: НТУУ «КПІ», 2017. С. 95.
25. Недашковская Н.И. Согласованность и неопределенность экспертных оценок при принятии решений. *Системний аналіз та інформаційні технології*: матеріали 18-ї міжнарод. наук.-техніч. конф. (Київ, 30 трав. – 2 черв. 2016 р.) Київ: ННК “ІПСА” НТУУ “КПІ”, 2016. С. 123.
26. Недашківська Н.І. Оцінювання стійкості розв’язку, отриманого методом аналізу ієрархій. *Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта*: матеріали міжнарод. научн. конф. (Херсон, 24 – 28 мая 2016 г.). Херсон: ПП Вишемирський В.С., 2016. С. 210 – 212.
27. Недашковская Н.И. Метод M_Outflow поиска наиболее несогласованных элементов матрицы парных сравнений. *Системний аналіз та інформаційні технології*: матеріали міжнарод. наук.-техніч. конф. (Київ, 22 - 25 черв. 2015 р.). Київ: ННК “ІПСА” НТУУ “КПІ”, 2015. С. 95.
28. Недашковская Н.И. Оценивание качества экспертной информации при анализе альтернатив решений. *Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта*: матеріали міжнарод. научн. конф. (Железний порт, 25 – 28 мая 2015 г.). Херсон: ХНТУ, 2015. С. 201 – 203.
29. Недашковская Н.И. Методы повышения согласованности матриц парных сравнений. *Интеллектуальный анализ информации*: сборник трудов міжнарод. науч. конф. им. Т.А.Таран (Киев, 20 – 22 мая 2015г.). Киев: «Просвіта», 2015. С. 146–151.
30. Недашковская Н.И. Подготовка экспертной информации для метода анализа иерархий. *Системний аналіз в проектуванні та управлінні*: сборник науч. трудов XVIII міжнарод. науч.-практич. конф. (Санкт-Петербург, 1 – 3 июля 2014г.). Санкт-Петербург, 2014. С.92 – 94.
31. Недашківська Н.І. Показники узгодженості експертних оцінок парних порівнянь та їх використання в задачах вибору альтернатив рішень. *Системний аналіз та інформаційні технології*: матеріали міжнарод. наук.-техніч. конф. (Київ, 26 – 30 трав. 2014 р.) Київ: ННК “ІПСА” НТУУ “КПІ”, 2014. С. 128.
32. Недашківська Н.І. Коригування матриці парних порівнянь без участі експерта. *Системний аналіз та інформаційні технології*: матеріали міжнарод. наук.-техніч. конф. (Київ, 27 – 31 трав. 2013 р.). Київ: ННК “ІПСА” НТУУ “КПІ”, 2013. С. 142.
33. Панкратова Н.Д., Недашковская Н.И. Метод аналитических сетей и его применение в принятии решений. *Автоматика*: матеріали міжнарод. конф. по автоматическому управленію (Николаев, 25 – 27 сент. 2013 г.). Николаев: Юго-Восток, 2013. С. 324 – 325.

34. Недашковская Н.И. Гибридный метод поддержки принятия решений в нечетких условиях при взаимозависимых критериях. *Системний аналіз та інформаційні технології*: матеріали міжнарод. наук.-техніч. конф. (Київ, 24 квіт. 2012 р.). Київ: ННК “ІПСА” НТУУ “КПІ”, 2012. С. 95 – 96.
35. Недашковская Н.И. Оценивание чувствительности спектрального коэффициента согласованности нечетких экспертных оценок парных сравнений. *Інтелектуальний аналіз інформації*: збірка праць XII міжнарод. конф. (Київ, 16 – 18 трав. 2012 р.) Київ: Просвіта, 2012. С.226 – 232.
36. Панкратова Н.Д., Недашковская Н.И. Выбор технологии восстановления нефтезагрязненных грунтов и водоемов с использованием метода VOCR анализа иерархий. *Системний аналіз. Інформатика. Управління*: матеріали III міжнарод. наук.-практич. конф. (Запоріжжя, 14–16 берез. 2012 р.). Запоріжжя: КПУ, 2012. С.218 – 220.
37. Панкратова Н.Д., Недашківська Н.І. Застосування методів аналізу ієрархій з врахуванням оцінок групи експертів до розв’язання задач передбачення. *Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем*: матеріали IX міжнарод. наук.-практич. конф. (Дніпропетровськ, 23 – 25 листоп. 2011 р.). Дніпропетровськ, 2011.
38. Недашківська Н.І. Багатокритеріальне оцінювання альтернатив при взаємозалежних критеріях за допомогою методу VOCR/MAI та нечітких мір. *Системи підтримки прийняття рішень. Теорія і практика*: матеріали наук.-техн. конф. з міжнародною участю СППР (Київ, 26-30 трав. 2011 р.). Київ: ІПММС НАНУ, 2011. С. 42 – 45.
39. Недашківська Н.І. Моделі оптимізації розрахунку ваг в методі парних порівнянь. *Системний аналіз та інформаційні технології*: матеріали міжнарод. наук.-техніч. конф. (Київ, 23 – 28 трав. 2011 р.) Київ: ННК “ІПСА” НТУУ “КПІ”, 2011. С.123.
40. Недашківська Н.І., Омельченко О.С. Групові методи аналізу ієрархій при неповних експертних оцінках та їх застосування до оцінювання кредитоспроможності позичальників. *Інтелектуальний аналіз інформації*. збірка праць XI міжнарод. конф. (Київ, 17 – 20 трав. 2011р.). Київ: Просвіта, 2011. С. 136 – 142.
41. Панкратова Н.Д., Недашковская Н.И. Выбор системы электронного документооборота компании с использованием нечеткого метода анализа иерархий. *Інформаційні технології і системи в документознавчій сфері*: матеріали міжнарод. наук.-практич. конф. (Донецьк, 30 берез. - 01 квіт. 2011р.). Донецьк: Юго-Восток, 2011. С. 80 – 82.
42. Панкратова Н.Д., Недашківська Н.І. Оцінювання пріоритетних технологій за напрямками науково-технологічного розвитку на основі системної методології передбачення. *Інформація, аналіз, прогноз – стратегічні важелі ефективного державного управління*: матеріали VII міжнарод. наук.-практич. конф. (Київ, 12 – 15 жовт. 2010 р.). Київ: УкрІНТЕІ, 2010. С. 130 – 131.
43. Недашківська Н.І. Кількісна оцінка чутливості задачі обробки поглядів експертів за методами аналізу ієрархій. *Системи підтримки прийняття рішень. Теорія і практика*: матеріали наук.-техніч. конф. з міжнародною участю (Київ, 26–30 трав 2010 р.). Київ: ІПММС НАНУ, 2010. С. 42 – 45.

44. Недашківська Н.І. Адаптивне стратегічне планування розвитку підприємства з використанням нечіткого методу аналізу ієрархій. *Системний аналіз та інформаційні технології*: матеріали XII міжнародної науково-технічної конференції SAIT-2010 (Київ, 25–29 трав. 2010 р.). Київ: НТУУ «КПІ», 2010. С.123.
45. Недашківська Н.І., Креп Л.О. Прийняття рішень при нечітких експертних оцінках парних порівнянь альтернатив. *Системний аналіз та інформаційні технології*: матеріали XII міжнарод. наук.-техніч. конф. (Київ, 25–29 трав. 2010 р.) Київ: НТУУ «КПІ», 2010. С.124.
46. Недашківська Н.І. Оцінювання якості кластеризації методами багатокритеріальної підтримки прийняття рішень. *Системний аналіз та інформаційні технології*: матеріали XII міжнарод. наук.-техніч. конф. (Київ, 25–29 трав. 2010 р.) Київ: НТУУ «КПІ», 2010. С.294.
47. Недашковская Н.И. Методологическое и математическое обеспечение оценивания направлений развития социально-экономических систем. *Информационно-компьютерные технологии в экономике, образовании и социальной сфере*: материалы V Всеукраин. науч.-практич. конф. (Симферополь, 13 – 14 мая 2010 г.). Симферополь: КРП «Издательство «Крымучпедгиз», 2010. С. 61 – 62.
48. Недашковская Н.И. Интегрированные методы поддержки принятия решений в условиях нестохастической неопределенности. *Системний аналіз та інформаційні технології*: матеріали XI міжнарод. наук.-техніч. конф. (Київ, 26–30 трав. 2009 р.). Київ: НТУУ «КПІ», 2009. С. 161.
49. Недашковская Н.И. Нелинейный синтез в методе анализа иерархий. *Системний аналіз та інформаційні технології*: матеріали XI міжн. наук.-техніч. конф. (Київ, 26–30 трав. 2009 р.). Київ: НТУУ «КПІ», 2009. С. 162.
50. Pankratova N.D., Nedashkovskaya N.I. Estimation of Scenarios of Innovation Projects Using Fuzzy Experts' Judgments. *21st International CODATA Conference: Proceedings* (Kyiv, Ukraine, 5-8 October 2008.). Kyiv, 2008. P.89.
51. Nedashkovskaya N.I. Multi-criteria decision-making with incomplete expert information using the DS/AHP method. *21st International CODATA Conference: Proceedings* (Kyiv, Ukraine, 5-8 October 2008). Kyiv. P.91 – 92.
52. Недашківська Н.І. Мережевий метод розв'язання багатокритеріальних задач з використанням нечітких експертних оцінок. *Интеллектуальный анализ информации*: материалы VIII международ. конф. (Киев, 14 - 17 мая 2008 г.). Киев: «Просвіта», 2008. С. 315 – 324.
53. Недашковская Н.И. Оценивание реверса рангов в методе DS/AHP. *Системний аналіз та інформаційні технології*: матеріали X міжн. наук.-техніч. конф. (Київ, 20–24 трав. 2008 р.) Київ: НТУУ «КПІ», 2008. С. 87.
54. Недашковская Н.И. Модели парных сравнений на основании интервальных оценок экспертов. *Питання прикладної математики і математичного моделювання*. Збірник наукових праць. 2015. Вип. 15. С.121 – 137.
55. Панкратова Н.Д., Недашківська Н.І. Моделі і методи аналізу ієрархій: Теорія. Застосування/ **навч. посіб.** з грифом МОН України. Київ: ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 2010. 371 с.

АНОТАЦІЯ

Недашківська Н.І. Методологія та інструментарій підтримки прийняття рішень на основі ієрархічних та мережевих моделей. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.04 «Системний аналіз і теорія оптимальних рішень». – Інститут прикладного системного аналізу Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2018.

У дисертаційній роботі запропоновано методологію підтримки прийняття рішень, яка з використанням розробленого системного підходу дозволяє підвищити достовірність розв'язків в складних слабо структурованих системах на основі ієрархічних та мережевих моделей і включає нові та удосконалені методи: оцінювання і підвищення узгодженості матриць парних порівнянь загального виду залежно від властивостей цих матриць, розрахунку довірчих інтервалів для локальних ваг, розрахунку нечітких локальних ваг, гібридний метод розрахунку локальних та агрегованих ваг, метод комплексного оцінювання чутливості розв'язку та спосіб оцінювання реверсу рангів при використанні різних правил комбінування функцій довіри. Розроблено нові методики, засоби та система моделювання експертного оцінювання.

Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні інструментарію у вигляді системи підтримки прийняття рішень, який застосовано при розв'язанні практичних задач на замовлення міністерств і відомств України.

Ключові слова: багатокритеріальний аналіз, узгодженість оцінок експерта, матриці парних порівнянь, довірчі інтервали до ваг, нечіткі локальні ваги, чутливість, стійкість ранжування, реверс рангів, правила комбінування функцій довіри, аналіз ефективності, моделювання експертного оцінювання.

АННОТАЦИЯ

Недашковская Н.И. Методология и инструментарий поддержки принятия решений на основе иерархических и сетевых моделей. – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.05.04 «Системный анализ и теория оптимальных решений». – Институт прикладного системного анализа Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, 2018 г.

В диссертационной работе предложена методология поддержки принятия решений, которая с использованием разработанного системного подхода позволяет повысить достоверность решений в сложных слабо структурированных системах на основе иерархических и сетевых моделей и включает новые и усовершенствованные методы: оценки и повышения согласованности матриц парных сравнений общего вида в зависимости от свойств этих матриц, расчета доверительных интервалов для локальных весов, расчета нечетких локальных весов, гибридный метод расчета локальных и агрегированных весов, метод комплексной оценки чувствительности решения, а также способ оценки реверса рангов при использовании различных пра-

вил комбинирования функций доверия. Разработаны новые методики, средства и система моделирования экспертного оценивания.

Практическое значение полученных результатов заключается в создании инструментария в виде системы поддержки принятия решений, который применен при решении практических задач по заказу министерств и ведомств Украины.

Ключевые слова: многокритериальный анализ, согласованность оценок эксперта, матрицы парных сравнений, доверительные интервалы к весам, нечеткие локальные веса, чувствительность, устойчивость ранжирования, реверс рангов, правила комбинирования функций доверия, анализ эффективности, моделирование экспертного оценивания.

SUMMARY

Nedashkovskaya N.I. Methodology and decision support system on basis of hierarchical and network decision models. – Manuscript.

Thesis for doctoral degree in specialty 01.05.04 “System analysis and theory of optimal solutions”. – Institute for applied system analysis of National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, 2018.

In the dissertation work, an important scientific and technical problem has been solved, which deals with development of mathematical and methodological support for increasing the reliability of solutions to decision analysis problems in complex weakly structured systems based on hierarchical and network models.

The scientific novelty of the work is determined by the following theoretical and practical results obtained by author. Using proposed systematic approach, a new methodology of decision support is developed, which allows to increase the reliability of solutions of decision analysis problems in complex weakly structured systems on the basis of hierarchical and network models. This methodology includes the proposed and described below methods and techniques. A new method for evaluating and improving the consistency of expert judgements, which are given in a form of pairwise comparison matrix, is developed. Features of the method include an analysis of property of weak inconsistency, the presence of cycles in a pairwise comparison matrix and a search for the most inconsistent element of this matrix. The method can be applied to pairwise comparison matrices of various types, including multiplicative, additive, fuzzy and other. A Transitive method for searching the most inconsistent elements of the matrix is proposed. A method of flows for finding the most inconsistent element of the matrix is improved by taking into account the input flow. The simulation shows that the developed Transitive method and the method of flows are more efficient than existing methods. Usage of the proposed method of consistency evaluating and improving allows to obtain pairwise comparison matrices of acceptable quality for all elements of the model and these matrices can be used further to find local weights of model's elements.

A new method for calculating confidence intervals of local weights is developed, which, unlike others, takes into account the uncertainty of scale, expert's personal qualities such as optimism and pessimism, and does not require comparison of groups of elements with the frame. The method is based on notions of the Dempster-Schafer theory of evidence and results of computer simulation of expert's judgments. An uncertainty index of expert judgments is proposed, assuming that this uncertainty is caused by above factors.

An improved method for calculating fuzzy local weights on basis of fuzzy pairwise comparison matrix is proposed, which differs from others in estimating and increasing the consistency of the matrix and taking into account properties of weak and strong order preservation on a set of calculated fuzzy weights. This method, unlike existing ones, makes it possible to determine the weak inconsistency of fuzzy matrix, to assess the acceptability of inconsistency level of fuzzy matrix for reliable local weights calculation, and to find the most inconsistent elements of the matrix using methods developed for crisp matrices.

A hybrid method for calculating aggregated weights of hierarchical model elements with interdependent decision criteria has been improved, when input data for evaluation are fuzzy expert judgments. Improvement consists in using the developed more effective methods for assessment and increasing of crisp and fuzzy expert judgements consistency.

A method for complex sensitivity analysis of results has been improved by taking into account sensitivity analysis of local rankings of model's elements. In the developed method for estimating local sensitivity, intervals and indices of stability of pairwise comparison matrix elements are calculated, which retain the best decision alternative and all ranking of alternatives. Resulting stability intervals allow to find critical elements of the problem that require more careful analysis.

A new technique for estimating the rank reversal is suggested, which can appear after applying combination rules of confidence functions for model's elements. Using this technique, the Dempster, Yager, Zhang, Dubois and Prada and other combination rules were examined. Cases and features of rank reversals appearance in these rules were revealed.

New techniques and tools for modeling a process of decision alternatives evaluation by an expert of high competence, expert-optimist and expert-pessimist while performing pairwise comparisons are developed. Using these techniques and tools, efficiency of proposed methods has been proved.

A decision support system has been constructed on basis of proposed methods and techniques. This system has been used to solve several practical problems. Within the work with the Ministry of Education and Science of Ukraine, critical technologies of the Ukrainian energy industry were assessed, priorities of technologies were calculated and aggregated according to hierarchical model of criteria, and on their basis the most priority technologies for implementation were identified. In the course of research work together with the Institute of Space Research, directions of the expedient use of space information for remote sensing of the Earth for geoinformation systems were evaluated and the relative demand for the space information in the national economy of Ukraine was determined. On order of the Kyiv City State Administration, social problems of the Kyiv city were estimated in terms of benefits, costs, opportunities and risks, followed by selection of priority activities for implementation and evaluation of scenarios of the transport system development. Results of the dissertation work have been introduced into the educational process of the department "Mathematical methods of system analysis" of Institute for applied system analysis of National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".

Keywords: multiple criteria analysis, the analytic hierarchy process, pairwise comparison matrix, consistency of expert judgments, confidence intervals for local weights, fuzzy local weights, sensitivity analysis, stability intervals, rank reversals, combinations rules, efficiency analysis, modeling